



**Certificado en ISO 9001:2000
Laboratorios acreditados por EMA**

SECRETARÍA DE
COMUNICACIONES
Y TRANSPORTES



“IMT, 20 años generando conocimientos y tecnologías para el desarrollo del transporte en México”

DURABILIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA DE CONCRETO REFORZADO EXPUESTA A DIFERENTES AMBIENTES URBANOS DE MÉXICO

Raquel López Celis
José Trinidad Pérez Quiroz
Andrés Antonio Torres Acosta
Miguel Martínez Madrid
Wilfredo Martínez Molina
Luis Eduardo Ariza Aguilar
Emilio Zamudio Cíntora
Joan Genescá Llongueras
Benjamín Valdez Salas

**Publicación Técnica No 292
Sanfandila, Qro 2006**

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Durabilidad de la Infraestructura de
concreto Reforzado Expuesta a Diferentes
Ambientes Urbanos de México**

**Publicación Técnica No. 292
Sanfandila, Qro, 2006**

Créditos y agradecimientos

Este documento fue elaborado por la Ing Raquel López Celis, asistente de investigador de la Universidad Autónoma de Chihuahua, el M C José Trinidad Pérez Quiroz y el Dr Andrés Torres Acosta, investigadores, y el Dr. Miguel Martínez Madrid, coordinador; todos pertenecientes a la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural (CIVIE) del Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Se agradece la colaboración de los siguientes centros de investigación participantes: Centro Tecnológico del Concreto, Cementos APASCO por la donación del concreto y la fabricación de todos los prismas de este proyecto y por la administración de una estación de monitoreo Duracon; Servicio Meteorológico Nacional por aportar los datos Meteorológicos de las estaciones; Facultad de Química de la UNAM por la administración de una estación de monitoreo Duracon; Comisión Nacional del Agua por aportar datos meteorológicos de la estación Querétaro; Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por la administración de una estación de monitoreo Duracon; el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California en Mexicali por la administración de una estación de monitoreo Duracon; y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana por la administración de una estación de monitoreo Duracon. Se agradece también a la Dra. Oladis Troconis de Rincón, de la Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela, por haber encomendado al grupo de Materiales del Laboratorio de Desempeño de Materiales y Vehículos, de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural de este Instituto, la Coordinación de este proyecto Iberoamericano en México.

INDICE

Créditos y agradecimientos	iii
Resumen	ix
Abstract	xi
Resumen Ejecutivo	xiii
Capítulo 1 Antecedentes	1
1.1 Fichas de identificación de las estaciones de monitoreo	5
1.2 Justificación	7
1.3 Fundamentación teórica	8
1.4 Objetivo	9
1.5 Hipótesis	9
1.6 Metodología	9
1.7 Utilidades del proyecto	10
Capítulo 2 Marco teórico	11
2.1 Corrosión	11
2.2 Concreto reforzado	12
2.3 Corrosión por penetración de cloruros	12
2.4 Corrosión por carbonatación	14
2.5 Diseño de mezclas	16
2.5.1 Cemento	16
2.5.2 Agregados pétreos: arena y grava	17
2.5.2.1 Reacción álcali, agregado	18
2.5.3 Agua	18
2.5.4 Aditivo	18
2.6 Pruebas realizadas al concreto fabricado	19
2.6.1 Pruebas al concreto fresco	19
2.6.1.1 Cohesión y trabajabilidad	19
2.6.1.2 Determinación de la temperatura de mezcla de concreto	19
2.6.1.3 Revenimiento	20
2.6.1.4 Peso volumétrico	20
2.6.1.5 Contenido de aire	20
2.6.1.6 Sangrado en el concreto	20
2.6.1.7 Curado	21
2.6.2 Pruebas al concreto endurecido	22
2.6.2.1 Pruebas de resistencia mecánica	22
2.6.2.2 Pruebas de resistencia mecánica comprensión simple	22
2.6.2.3 Prueba de resistencia mecánica a tensión indirecta	22
2.6.2.4 Prueba de resistencia mecánica a tensión por flexión	22
2.6.2.5 Pruebas de deformabilidad	23

2.6.2.5.1 Prueba de módulo de elasticidad y relación de Poisson del concreto a compresión	23
2.6.2.5.2 Prueba de contracción por secado del concreto hidratado	23
2.6.2.6 Pruebas de impermeabilidad	23
2.6.2.6.1 Prueba de densidad, absorción y vacío en el concreto	24
2.6.2.6.2 Prueba de absorción capilar	24
2.6.2.6.3 Prueba de resistencia a la penetración de fluidos (ión cloruro)	24
2.6.2.6.4 Pruebas de resistencia a la congelación y deshidratación	24
2.6.2.6.5 Pruebas de resistencia superficial	25
2.7 técnicas electroquímicas	25
2.7.1 Potencial de corrosión (e_{corr} en mv)	25
2.7.2 Velocidad de corrosión (i_{corr} en $\mu\text{a}/\text{cm}^2$)	25
2.7.2.1 Intensidad de corriente de corrosión	26
2.7.3 Resistividad eléctrica ($k\Omega\cdot\text{cm}$)	27
2.7.4 Resistencia eléctrica ($k\Omega$)	28
Capitulo 3 Metodología experimental	29
3.1 Construcción de especímenes	29
3.1.1 Diseño de la mezcla	29
3.1.1.1 Características y propiedades de los materiales utilizados	34
3.1.1.1.1 Cemento	34
3.1.1.1.2 Agregados pétreos arena y grava	34
3.1.1.1.3 Agua	34
3.1.1.1.4 Aditivo	35
3.1.2 Preparación del acero de refuerzo	35
3.1.3 Pruebas realizadas al concreto fresco	42
3.1.3.1 Cohesión y trabajabilidad	42
3.1.3.2 Determinación de la temperatura de la mezcla del concreto	42
3.1.3.3 Revenimiento	43
3.1.3.4 Peso volumétrico	43
3.1.3.5 Contenido de aire	44
3.1.3.6 Sangrado en el concreto	44
3.1.3.7 Curado	45
3.1.4 Pruebas realizadas al concreto endurecido	46
3.1.4.1 Prueba de resistencia mecánica a compresión simple	46
3.1.4.2 Prueba de resistencia mecánica a tensión indirecta	47
3.1.4.3 Prueba del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson del concreto a compresión	47
3.1.4.4 Prueba de densidad, absorción y vacíos	47
3.1.4.4.1 Método de ensayo de Fagerlund	47

3.1.4.4.2 Absorción capilar	48
3.2 Identificación de los especímenes	48
3.3 Construcción de los especímenes	48
3.4 Ubicación de los especímenes en la estación de campo	51
3.5 Monitoreo de las estaciones de campo	53
3.5.1 Pruebas realizadas a los especímenes de concreto con acero de refuerzo (pruebas electroquímicas)	53
3.5.1.1 Procedimiento de las mediciones electroquímicas	53
3.5.2 Pruebas realizadas a los especímenes de concreto sin acero de refuerzo	56
3.5.2.1 Determinación de la profundidad de carbonatación e_{CO_2}	57
3.5.2.2 Determinación de la velocidad de carbonatación	60
3.5.2.3 Preparación de las muestras para la determinación de la concentración de cloruros en el concreto	60
3.5.2.4 Preparación de las muestras para la determinación de la resistividad eléctrica en el concreto	64
Capítulo 4 Resultados	67
4.1 Resultados de los materiales utilizados	67
4.1.1 Composición química del cemento utilizado	67
4.1.2 Estudio petrográfico del agregado fino	68
4.1.3 Prueba de reactividad potencial de los agregados con álcalis del cemento por el método químico según normas NMX C271 y ASTM C289	70
4.1.3.1 Determinación de la reactividad potencial del agregado fino	70
4.1.3.2 Determinación de la reactividad potencial del agregado grueso	71
4.1.4 Características técnicas del aditivo utilizado	72
4.2 Resultado de las pruebas hechas en concreto fresco	73
4.2.1 Resultados de cohesión y trabajabilidad	73
4.2.2 Resultados de revenimiento	73
4.2.3 Resultados de peso volumétrico	74
4.2.4 Resultados de contenido de aire	74
4.3 Resultados de las pruebas del concreto endurecido	75
4.3.1 Resultados de la prueba de resistencia mecánica a compresión simple	75
4.3.2 Resultados de la prueba de resistencia mecánica a la tensión indirecta	76
4.3.3 Resultados de la prueba del módulo de elasticidad y relación de Poisson	76
4.3.4 Resultados de la prueba de densidad, absorción y vacíos	76
4.3.4.1 Absorción después de inmersión	76
4.3.4.2 Absorción después de inmersión y absorción total	77
4.3.4.3 Porosidad total	77

4.3.5 Resultados de la prueba de absorción capilar (anexo a) método de ensayo Fagerlund	78
4.4 Resumen de resultados de las pruebas realizadas al concreto	79
4.4.1 Resultados de las pruebas del concreto fresco	79
4.4.2 Resultados de las pruebas del concreto endurecido	80
4.5 Resumen e resultados de las pruebas de campo	81
4.5.1 Resultados de parámetros ambientales	81
4.5.2 Resultados electroquímicos	87
4.5.3 Resultados de carbonatación	95
Capitulo 5 Discusión de resultados	101
5.1 Análisis de resultados de las mezclas de concreto	101
5.2 Análisis de acuerdo con la cantidad de cemento utilizado	102
5.3 Análisis de la reactividad potencial de los agregados	104
5.4 Análisis del revenimiento, cohesión y trabajabilidad en relación al aditivo	104
5.5 Análisis de la resistencia a la compresión	105
5.6 Análisis de la resistencia a la mecánica a tensión indirecta	107
5.7 evaluación de la resistencia a la compresión con relación a la resistencia a la tensión indirecta	109
5.8 Análisis del módulo de elasticidad	111
5.9 Análisis de la porosidad total y la absorción total	116
5.10 Análisis de los resultados de la prueba de absorción capilar método de ensayo de Fagerlund	117
5.10.1 Absorción capilar	118
5.11 Análisis de los resultados electroquímicos de las estaciones de campo	120
5.12 Análisis de los resultados de carbonatación de las estaciones de campo	127
Capitulo 6 Conclusiones y recomendaciones	139
6.1 Conclusiones	139
6.2 Recomendaciones	140
Capitulo 7 Referencias	143
Anexos	149

Resumen

Este proyecto busca caracterizar la durabilidad de concretos expuestos a condiciones ambientales reinantes en diferentes ciudades de México, utilizando estaciones de ensayo de exposición a la atmósfera con base en la colocación de probetas armadas y sin armar en al menos atmósferas distintas: marina y urbana. Se diseñaron dos tipos de concreto, uno con una relación $a/c = 0,65$ y otro de relación $a/c = 0,45$. Los ensayos se centraron principalmente en la caracterización de los procesos de carbonatación y penetración de cloruros en el concreto, y en la determinación del contenido crítico de cloruros de inicio de corrosión, así como en la medida de parámetros electroquímicos que permitan evaluar la cinética de corrosión de las armaduras.

La variedad de climas/microclimas que posee México permitirá una caracterización completa del comportamiento del concreto armado, tanto desde el punto de vista de carbonatación del concreto como de la penetración de iones cloruro en el mismo, que induciría a la corrosión de la armadura. Esto permitirá identificar los niveles del ión cloruro que inducen a la corrosión de la armadura, dependiendo de las condiciones meteorológicas y químicas de exposición.

Toda esta información permitirá, con el uso de modelos específicos, diseñar obras de concreto armado durables, y reparar adecuadamente las ya existentes, lo que repercutirá en un decremento sustancioso en las pérdidas económicas que actualmente causa el fenómeno de la corrosión en el país.

PALABRAS CLAVE: Durabilidad, Concreto Armado, Corrosión, Cloruros, Carbonatación.

Abstract

The aim of this project is to characterize the durability of concrete exposed to prevailing environmental conditions in Mexico, using atmospheric exposition in different test sites. The project is based on the exposure of reinforced and non reinforced concrete prisms in at least two different atmospheres: marine and urban. Two types of concrete were used with w/c ratios of 0.65 and 0.45. The tests were performed mainly on carbonation and chloride penetration processes characterization. Critical chloride content determination when corrosion started from electrochemical measurements was also included.

The different climate/microclimates variables chosen in Mexico will permit a full concrete damage characterization both, from the carbonation and chloride penetration standpoint. The characterization included reinforcement corrosion and carbonation concrete performance. Levels of chloride ions that induce reinforcement corrosion can then be identified, depending on meteorological and chemical exposure conditions.

The use of the data obtained in this investigation together with of specific models, will help engineers with the design of durable reinforced concrete structures and the implementation of adequate repair procedures for existing damaged concrete structures. This will lead to a substantial decrease in the economic losses currently being caused by corrosion phenomena in our country.

KEY WORDS: Durability, Reinforced Concrete, Natural Test, Corrosion, Chloride, Carbonation

Resumen Ejecutivo

Este trabajo presenta una introducción al tema de degradación por corrosión, planteando los problemas más comunes que se generan debido a ese deterioro en la infraestructura de concreto, seguido de una breve explicación de los mecanismos básicos de corrosión del acero de refuerzo en concreto.

Se presenta una breve explicación de los procedimientos para la caracterización de los materiales utilizados: concreto y acero. Así como de las pruebas realizadas a los especímenes de concreto durante todo el proceso de fabricación, hasta obtener los especímenes deseados. Se describe la colocación de las estaciones de monitoreo, así como los requisitos y aditamentos necesarios para realizar el monitoreo electroquímico y el monitoreo meteorológico; se presentan los resultados de las pruebas hechas al concreto fresco y fraguado, así como los resultados meteorológicos y electroquímicos acompañados de resultados del proceso de carbonatación. Se reportan los resultados del experimento y una discusión de estos obtenidos en este trabajo. Finalmente, se exponen las conclusiones y el listado de referencias utilizadas en este trabajo.

1 Antecedentes

El concreto con acero de refuerzo y preesfuerzo es uno de los materiales de construcción más empleado en nuestros días debido a las bondades que presenta. Se creía que su vida útil era muy larga; sin embargo, existe un gran número de estructuras prematuramente deterioradas por corrosión del acero de refuerzo.

La preocupación generada por este fenómeno, así como los grandes costos por mantenimiento o reemplazo que éste genera, motivó a diversos organismos a nivel mundial, a realizar estudios que los llevaron a determinar las causas, consecuencias, y alternativas de solución para combatir la corrosión en la infraestructura de concreto.

Es importante resaltar que la calidad y la duración de las estructuras de concreto reforzado dependen de la correcta evaluación, y de un diagnóstico del problema basados en procedimientos adecuados de inspección. Numerosos organismos a nivel mundial como la Portland Cement Association (PCA); Strategic Highway Research Program (SHRP); American Concrete Institute (ACI); American Society for Testing and Materials (ASTM); The National Association of Corrosion Engineers (NACE International); Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Constructions et Ouvrages' (RILEM); Comité Electrotechnique Belge (CEB); y The National Materials Advisory Board (NMAB), han venido trabajando consistentemente para documentar el tema. Sin embargo, al no existir un consenso sobre evaluaciones, las inspecciones se realizan de forma diferente causando en algunas ocasiones, inadecuadas reparaciones y generando excesivos costos en la rehabilitación. ^[1]

Consciente de este problema y de sus dificultades de solución el Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), en el marco del Subprograma XV "Corrosión e Impacto Ambiental sobre los Materiales", en el Proyecto XV.3 "Influencia de la Acción del Medio Ambiente en la Durabilidad del Concreto" (DURACON) integró a nivel iberoamericano la Red Temática de Durabilidad de la Armadura (DURAR), conformada por especialistas de Argentina, Brasil, Colombia, Cuba, España, México, Perú, Portugal, Uruguay y Venezuela. La Red, basándose en el intercambio de ideas, experiencias y resultados de investigación, tiene como objetivo general de unificar criterios y métodos de inspección, ensayo y evaluación con el fin de utilizar mejores sistemas de intervención, reparación y rehabilitación de las obras de concreto reforzado deterioradas por fenómenos de corrosión, y prevenir la aparición de ésta en obras nuevas. ^[1]

En nuestro país el organismo responsable de las actividades del proyecto es el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), en coordinación con un grupo de investigadores conformado por diversas instituciones públicas y privadas, dentro de las que se encuentran: el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV); Centro Tecnológico del Concreto (CTC); la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH); Universidad Autónoma de Baja California (UABC); Universidad Veracruzana (UV); el Instituto Tecnológico de Oaxaca (ITO), entre otros.

Este proyecto busca determinar la durabilidad de concretos expuestos a condiciones ambientales predominantes en México, basándose en la exposición de especímenes de concreto con acero y sin acero de refuerzo en ambientes diversos (urbana; marina; urbana – industrial; urbana – marina; rural – marina; e industrial - marina). Se diseñaron dos tipos de concretos; uno, con una relación a/c = 0.65; y otro de relación a/c = 0.45. Las pruebas están centradas principalmente en la determinación de los procesos de carbonatación, penetración de cloruros en el concreto y en la determinación del contenido crítico de cloruros de inicio de corrosión, así como la medida de parámetros electroquímicos que permiten evaluar la cinética de corrosión de las estructuras.

La diversidad de climas y microclimas que posee México permitirá efectuar una caracterización completa del comportamiento del concreto reforzado desde el punto de vista de carbonatación del concreto, como de la penetración de iones cloruro en el mismo, que inducen a la corrosión de la estructura dependiendo de las condiciones meteorológicas de exposición.

El deterioro de la infraestructura existente como; puentes, tuberías, tanques, edificios, canales, puertos, plantas de almacenamiento, aeropuertos, ferrocarriles, etc, es un problema serio en la actualidad que afecta no sólo a las dependencias responsables de ellas, sino que repercute indirectamente a la sociedad debido a que estas estructuras quedan inservibles tiempo antes de alcanzar el final de su vida útil de proyecto, y muchas de las veces se debe a que no se tiene un correcto diagnóstico de las condiciones que afectarán a la estructura a lo largo de su vida, como es el medio ambiente.

La Red Federal de Carreteras cuenta con 6,854 puentes ^[2]; la mayor parte de ellos construidos de concreto reforzado (67%) (ver Figura 1). Por su parte Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (CAPUFE) tiene a su cargo 2500 puentes de los cuales gran parte de ellos son también de concreto reforzado.

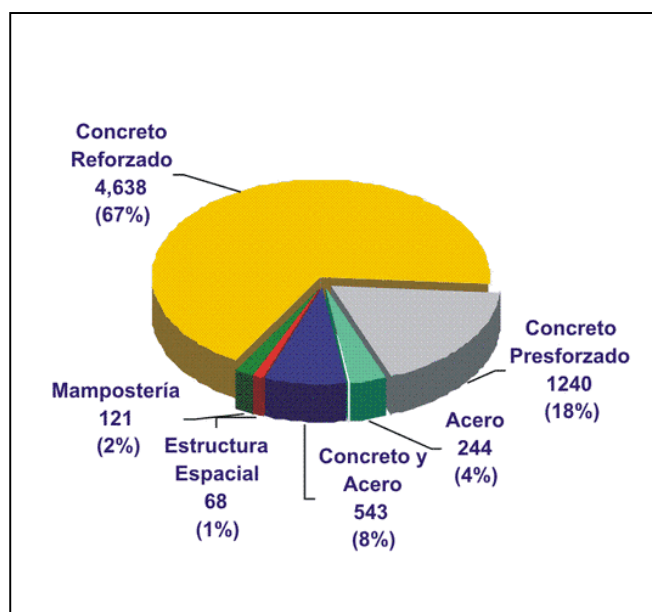


Figura 1.
Distribución de puentes por tipo de material ^[2]

Una cantidad considerable de estructuras a cargo de la Red Federal de Carreteras, presentan problemas de corrosión, por penetración de cloruros, por carbonatación o ambos; estos problemas no se presentan en igual proporción en todas las estructuras, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1.
Reporte de daños en puentes de la Red Federal de Carreteras ^{[2][3]}

Puentes prioritarios por corrosión		
Prioridad	Por penetración de cloruros ^[3]	Por carbonatación ^[4]
Alta	330	395
Media	3604	3951
Baja	2131	1719

Debido a que los problemas de corrosión en las estructuras dependen en gran medida al medio ambiente en las que se encuentran expuestas, es necesario analizar detalladamente el comportamiento de las estructuras en diversas condiciones ambientales, y poder determinar el tratamiento que se les debe dar a las estructuras existentes a fin de tomar en consideración dicho comportamiento para el diseño de nuevas estructuras.

Con la finalidad de cumplir con lo anterior, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) cuenta con 13 estaciones de monitoreo expuestas a lo largo del territorio nacional, (ver figura 2), de las cuales se obtienen datos de velocidad de corrosión; potencial de corrosión; resistividad eléctrica; determinación de la concentración de iones cloruro; profundidad de carbonatación; así como obtención de datos meteorológicos como: humedad relativa; temperatura; precipitación pluvial; velocidad del viento; radiación solar; tiempo de humectación y tiempo de insolación, también el contenido de compuestos de cloruros, de compuestos de azufre y de dióxido de carbono en la atmósfera. En este proyecto se analizarán sólo datos de seis estaciones de las 13 que son en total, éstas son las que se encuentran ubicadas en Querétaro (Mx8); Toluca (Mx9); Veracruz (Mx6); México D.F. (Mx7); Morelia (Mx5); y Mexicali (Mx10).

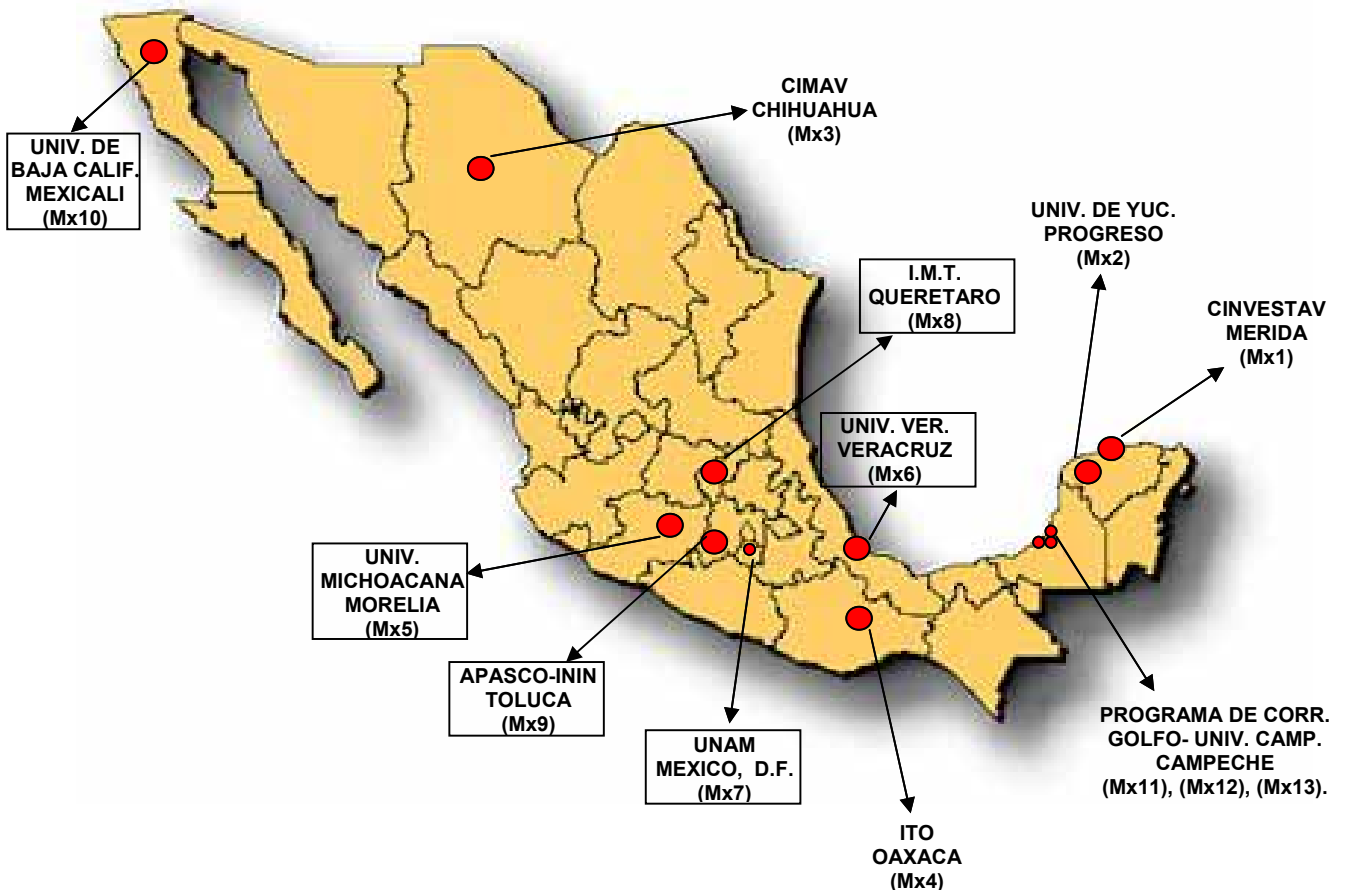


Figura 2.
Estaciones de monitoreo en la República Mexicana

1.1 FICHAS DE IDENTIFICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO.

Nombre de la Estación:	Morelia
Código de la Estación:	Mx5
Ciudad:	Morelia
Estado:	Michoacán
País:	México
Ubicación de la Estación:	Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Dirección de la Estación:	Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH, Morelia, Michoacán
Fecha de Instalación de la Estación:	22/10/2003
Atmósfera Aparente:	Urbano
Responsable de la Estación:	IMT y el Ing Wilfrido Martínez Molina

Nombre de la Estación:	Veracruz
Código de la Estación:	Mx6
Ciudad:	Veracruz
Estado:	Veracruz
País:	México
Ubicación de la Estación:	Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana
Dirección de la Estación:	Av Juan Pablo II s/n entre Ruiz Cortines y Reyes Heróles Boca del Río, Veracruz, CP 294294
Fecha de Instalación de la Estación:	26/06/2003
Atmósfera Aparente:	Urbano Marina
Responsable de la Estación:	IMT y el Ing Eduardo Ariza Aguilar

Nombre de la Estación:	México, D.F.
Código de la Estación:	Mx7
Ciudad:	Distrito Federal
Estado:	Distrito Federal
País:	México
Ubicación de la Estación:	Universidad Nacional Autónoma de México
Dirección de la Estación:	Edificio "D" de la Facultad de Química de la UNAM, México, D.F., CP 04510
Fecha de Instalación de la Estación:	02/04/2003
Atmósfera Aparente:	Urbano Industrial
Responsable de la Estación:	IMT y el Dr Joan Genescá Llongueras

Nombre de la Estación:	Querétaro
Código de la Estación:	Mx8
Ciudad:	Santiago de Querétaro
Estado:	Querétaro
País:	México
Ubicación de la Estación:	Estación Metereológica de la CNA Querétaro
Dirección de la Estación:	Carretera Queretaro-Galindo Km. 12, Sanfandila, Pedro Escobedo, Querétaro. CP 76700
Fecha de Instalación de la Estación:	03/05/2003
Atmósfera Aparente:	Urbano
Responsable de la Estación:	IMT

Nombre de la Estación:	Toluca
Código de la Estación:	Mx9
Ciudad:	Toluca
Estado:	Estado de México
País:	México
Ubicación de la Estación:	Centro Tecnológico de Cementos APASCO
Dirección de la Estación:	Prolongación Isidro Fabela Norte #1517 Col San Juan de la Cruz, Toluca, México.
Fecha de Instalación de la Estación:	01/05/2003
Atmósfera Aparente:	Urbano Industrial
Responsable de la Estación:	IMT y Centro Tecnológico del Concreto de APASCO

Nombre de la Estación:	Mexicali
Código de la Estación:	Mx10
Ciudad:	Mexicali
Estado:	Baja California
País:	México
Ubicación de la Estación:	Universidad Autónoma de Baja California
Dirección de la Estación:	Blvd. B. Juárez y Calle de la Normal s/n Col. Insurgentes Este, Mexicali, Baja California 21280
Fecha de Instalación de la Estación:	01/03/2003
Atmósfera Aparente:	Urbano
Responsable de la Estación:	IMT y el Dr. Benjamín Valdés

1.2 JUSTIFICACIÓN.

Este trabajo se justifica por la contribución al desarrollo económico y social, ya que una vez definida la influencia del medio ambiente en la infraestructura de concreto, se podrá diseñar de manera adecuada con criterios de durabilidad.

Los problemas actuales de corrosión en la infraestructura de concreto en el país causan no únicamente un gasto económico a las dependencias encargadas de rehabilitar las obras, sino también un problema social. Esto se manifiesta en la cantidad de hospitales, puentes, escuelas, edificios, instalaciones deportivas, etc, donde el costo de los perjuicios sociales (pérdidas indirectas) puede sobrepasar fácilmente los gastos de rehabilitación de la obra, llegando en algunos momentos a causar la pérdida de vidas humanas.

La infraestructura de concreto reforzado actualmente está sufriendo un deterioro acelerado; en muchos casos sin haber cumplido con la vida útil para la cual fue diseñada. Es por ello que resulta necesario calcular tanto el tiempo en que pueden llegar a un riesgo de falla, así como decidir el momento óptimo para iniciar su rehabilitación. A la vez es importante establecer el tipo de mantenimiento que se debe tener con la infraestructura, sujeta a ciertas condiciones ambientales, ya que el ambiente es un factor muy importante para su durabilidad.

1.3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La corrosión del acero de refuerzo es una de las causas responsables del deterioro de la infraestructura de concreto, que está llevando a elevados gastos de rehabilitación y mantenimiento.

Las investigaciones relacionadas con la corrosión de estructuras en los últimos diez años, han estado especialmente enfocadas al:

1. Estudio de las causas y mecanismos de deterioro
2. Desarrollo de técnicas electroquímicas de evaluación y control (tanto en laboratorio como in-situ)
3. Al empleo de métodos de protección

Recientemente se planteó la necesidad de cuantificar la vida útil de estructuras afectadas por corrosión, por lo que en los últimos años se ha centrado el interés en la búsqueda de modelos que permitan predecir la vida útil de las estructuras en servicio no deterioradas, o estimar la vida futura en el caso de nuevas, influyendo desde la etapa de proyecto.

La corrosión es un proceso que ocurre en fase acuosa en el concreto con acero de refuerzo. El fenómeno se observa con frecuencia en concretos de baja calidad.

La elevada alcalinidad que presenta la solución de los poros del concreto provee al acero de un medio protector en el cual la velocidad de corrosión es prácticamente nula. Esta condición se denomina pasividad; el estado pasivo de las estructuras puede perderse principalmente debido a la acción de dos mecanismos; penetración de cloruros y la pérdida de la alcalinidad del concreto. ^[5]

1.4 OBJETIVOS

- Determinar el grado de deterioro de probetas de concreto expuestos a diferentes ambientes de México
- Correlacionar la durabilidad del concreto por carbonatación en diferentes zonas urbanas de México

1.5 HIPÓTESIS

La infraestructura de concreto en ciudades mexicanas con alta contaminación por CO₂, SO₂ y humedad relativa promedio anual entre 50 y 70%, son más propensas a carbonatación y rompen así la pasividad del acero de refuerzo.

1.6 METODOLOGÍA

- Construcción de los bloques de concreto con y sin acero de refuerzo
- Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de las dos relaciones de concretos que serán expuestos en las estaciones de campo
- Exposición en las estaciones de campo de los bloques de concreto con y sin acero de refuerzo
- Monitoreo de seis estaciones de campo en México con diferentes parámetros atmosféricos
- Evaluación de los parámetros climático-ambientales como son la humedad relativa, temperatura, precipitación pluvial, velocidad del viento, radiación solar, y tiempo de insolación de las estaciones, con base en las Normas ISO para la clasificación de la agresividad atmosférica
- Obtención periódica de datos de velocidad de corrosión, potencial de corrosión, y resistencia eléctrica (resistividad eléctrica)
- Determinación de la profundidad y velocidad de carbonatación por periodos de un año aproximadamente
- Preparación de las muestras para pruebas de resistividad eléctrica del concreto

- Preparación de las muestras para determinar la concentración de iones cloruro, sulfato
- Evaluación de parámetros de durabilidad y de corrosión sobre los bloques de concreto a diferentes tiempos de exposición
- Análisis de los resultados de profundidad y velocidad de carbonatación

1.7 UTILIDAD DEL PROYECTO

La información generada proporcionará datos reales de diferentes ambientes mexicanos, y su agresividad para con una infraestructura de concreto. A su vez permitirá diseñar una infraestructura de concreto más durable en zonas urbanas, lo que repercutirá en un decremento sustancioso en las pérdidas económicas que actualmente causa el fenómeno de la corrosión en el país.

2 Marco teórico

En este capítulo se presenta la teoría detrás de los métodos de caracterización del sistema concreto/acero inoxidable utilizados en esta investigación.

2.1 Corrosión

La corrosión en el concreto reforzado se puede definir como la oxidación destructiva de materiales metálicos en un medio específico. La corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste en cuatro elementos principales: ^[1]

- Un ánodo, donde ocurre la oxidación
- Un cátodo, donde ocurre la reducción
- Un conductor metálico, donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones
- Un electrolito; en este caso el concreto, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso

El proceso de corrosión en el concreto reforzado se genera de la siguiente manera:

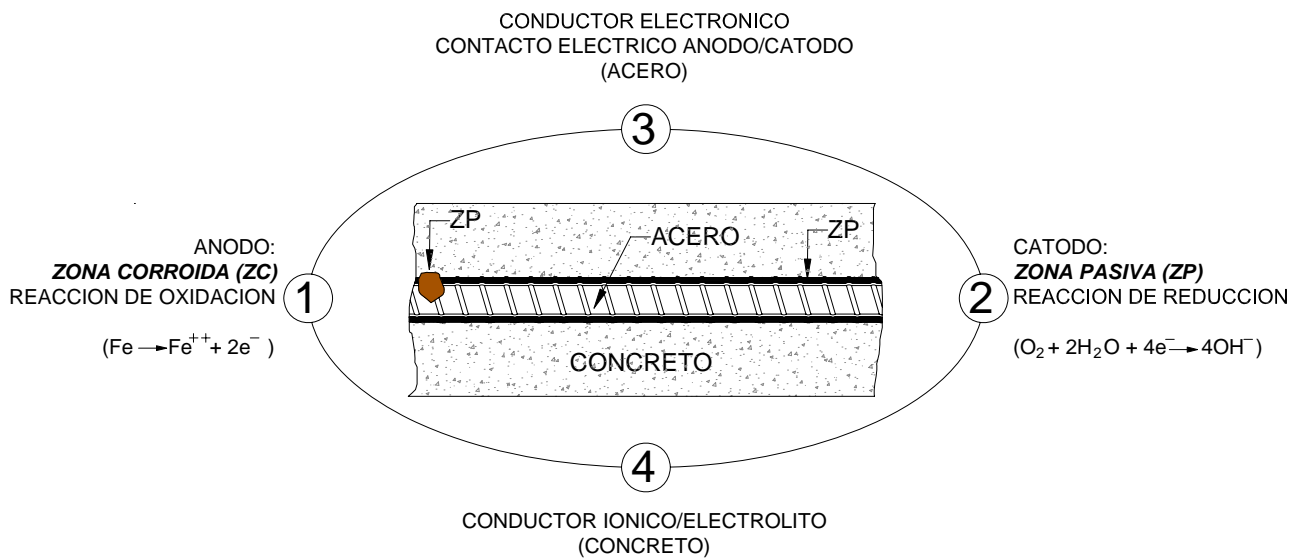


Figura 2.1
Elementos constituyentes de la celda de corrosión ^[1]

La corrosión electroquímica del acero en el concreto resulta de la falta de uniformidad en el acero (diferentes aceros, soldaduras, sitios activos sobre la superficie del acero), contacto con metales menos activos, así como, de las heterogeneidades en el medio químico o físico (concreto) que rodea al acero.

2.2 Concreto reforzado

Definimos al concreto reforzado como la unión entre concreto y acero; el concreto está compuesto básicamente por el agregado (arena y grava), cemento, agua y en algunos casos, aditivos; el acero que se utiliza depende en gran medida de las especificaciones de la estructura a construir; puede ser acero galvanizado, acero inoxidable o lo que se utiliza comúnmente: acero al carbón o de refuerzo.

La relación existente entre el concreto y el acero de refuerzo, se basa en que el concreto provee de una protección tanto química como física en contra de la corrosión. La protección química se debe a la alcalinidad del concreto, la cual produce una capa de óxido en la superficie del acero impidiendo que el acero continúe corroyéndose.^[6]

El concreto también funciona como una capa física protectora en contra de los agentes ambientales (oxígeno, agua, cloruros, dióxido de carbono) que puedan despasivar al acero e iniciar su corrosión. Sin embargo, en un ambiente agresivo, agentes químicos como los cloruros o sulfatos del agua de mar, o el dióxido de carbono de un ambiente urbano, se pueden acumular en la superficie del concreto y lentamente se transporta a través del recubrimiento de concreto hasta llegar al acero.^[7]

2.3 Corrosión por penetración de cloruros

La penetración de cloruros se produce cuando se dan diferencias de concentración entre dos puntos, lo que resulta ser el mecanismo de difusión en estructuras completamente sumergidas o en contacto permanente con agua de mar. En cambio, en zonas aéreas o sometidas a la acción de las mareas o salpicaduras se producen ciclos de humedad y secado, que dan lugar a mecanismos más rápidos de penetración de cloruros, ya que además de la difusión aparecen fenómenos de absorción capilar que conducen a difusividades más elevadas.^[8]

La porosidad del concreto es sin duda un factor crucial en todos estos fenómenos, ya que la penetración será más rápida cuando la porosidad del recubrimiento resulte ser mayor. Así, a bajas relaciones a/c y relativamente altos contenidos en cemento, dan una cierta garantía de lentas velocidades de penetración de los cloruros. El tipo de cemento y su capacidad de retener o combinar cloruros es otro de los parámetros relevantes del proceso.^[9]

La segunda ley de Fick es la más utilizada actualmente para hallar los coeficientes de difusión de cloruros **D** en estructuras reales y en laboratorio, con el fin de hacer predicciones.^[1] Sin embargo, cada vez aparecen más datos que señalan las limitaciones que presenta esta ecuación y que se manifiesta especialmente en la escasa relación entre los resultados de laboratorio y los de estructuras reales.

La posible causa de estas limitaciones puede tener varias justificaciones:^[10]

- Que los ensayos de laboratorio no reflejen la realidad debido a que el coeficiente de difusión no sea constante, sino que disminuya con el tiempo
- Que el límite de cloruros para despasivar la estructura sea mucho más elevado que el que consideran las normas (0.4% respecto al peso de cemento)^[5]
- La hipótesis de las condiciones de contorno que llevan a la solución a través de la función error (**erf[x]**) no sean las apropiadas y sea necesario utilizar otro tipo de condiciones. Como, por ejemplo:
 - a) Que contemplen el hecho de que la superficie del concreto tiene una composición distinta al concreto interior (efecto piel), haciendo significativamente diferente la difusividad (**D**) en ambas zonas
 - b) La variación de **Cs** con el tiempo, principalmente por el lavado de lluvias
 - c) Cómo varía el coeficiente **D** con la concentración de cloruros
 - d) Cómo afecta el envejecimiento del concreto (hidratación)
 - e) Cómo varía con el tipo de cemento
 - f) Las condiciones climáticas de entorno de la estructura

En cuanto al límite de cloruros que puede generar la despasivación de la armadura, se acepta como valor límite en el agua de amasado del concreto el 0.4% en peso de cemento^[11], o una relación $Cl^-/OH = 0.6$, si se trata de cloruros que penetran desde el exterior.^[8] De los escasos estudios realizados se origina una gran dispersión, incluso ante condiciones aparentemente idénticas. Se han identificado varios factores que pueden afectar a la no existencia de un valor único de umbral de cloruros para producir la despasivación de la armadura:^[12,13]

1. Tipo y contenido en cemento
2. Estado superficial del acero
3. Porosidad del concreto
4. Temperatura
5. Potencial electroquímico que presenta la estructura
6. Velocidad de penetración de **Cl⁻** (adicionados, penetración)
7. Características y espesor de la capa pasivante
8. Condiciones meteorológicas predominante en el área de entorno

Algunos de estos factores son difícilmente controlables en forma aislada, lo que finalmente conduce a que el estudio deba llevarse a través de tratamientos estadísticos que permitan definir los rangos de variación, según alguno de los factores descritos.

2.4. Corrosión por carbonatación

Por otra parte, la pérdida de alcalinidad del concreto denominada como carbonatación también es un problema que actualmente afecta a muchas estructuras en el país, este fenómeno ocurre cuando el dióxido de carbono CO_2 reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte al hidróxido de calcio Ca(OH)_2 con un pH de 12 a 13, a carbonato de calcio CaCO_3 que tiene un pH menos alcalino^[8] (ver figura 2.2) El hidróxido de calcio y los iones de sodio (**Na**) y potasio (**K**) por su alta alcalinidad, forma en el acero de refuerzo embebido en el concreto una capa pasiva de hidróxido de hierro Fe(OH)_2 , que lo cubre y protege de la corrosión. La permanencia de esta capa depende de que el concreto conserve dicha alcalinidad, la que al descender ante la presencia de dióxido de carbono en el concreto, el acero pierde su capa pasiva, se considera un pH menor a 11 para que se inicie este efecto.^[14]

Los factores que afectan durante la carbonatación son: el contenido de humedad; el contenido de CO_2 y SO_2 en el ambiente atmosférico; y la permeabilidad del concreto. El contenido de humedad relativa ambiental es un factor importante para que exista carbonatación, pero con mayor rapidez en el intervalo de 50 - 70% aproximadamente;^[15] a bajas humedades no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de carbono y en humedades altas, los poros se bloquean y evitan el ingreso del dióxido de carbono (ver tabla 2.1).

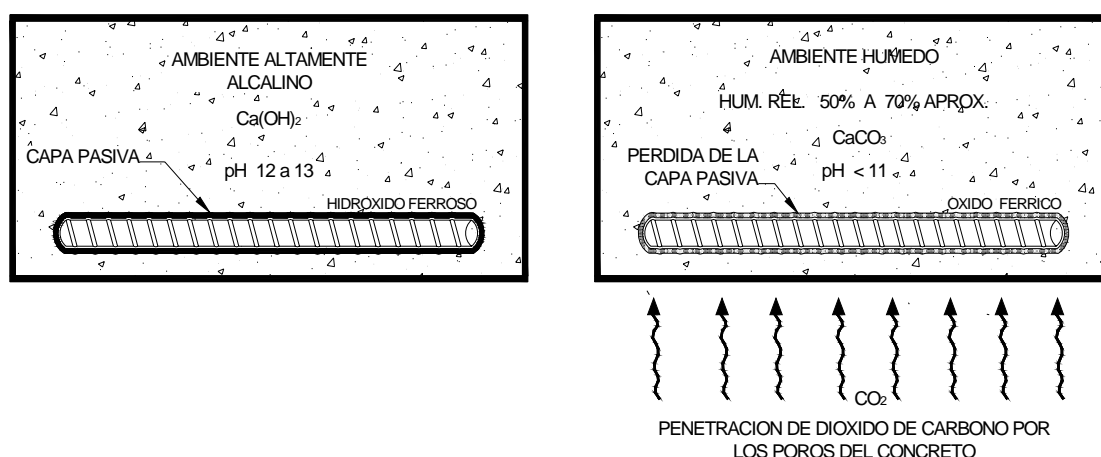


Figura 2.2.
Proceso de carbonatación del concreto con acero de refuerzo.

Tabla 2.1.
Proceso de carbonatación en relación con la humedad relativa.

Humedad Relativa % (HR)	Proceso de Carbonatación
HR > 70%	Evita el ingreso de CO ₂
50% < HR < 70%	Avanza rápidamente
HR < 50 %	No hay suficiente agua para que se disuelva el CO ₂

El contenido de CO₂ en la atmósfera, depende en gran medida de la actividad económico-industrial que se desarrolle en el lugar ya que existen grandes diferencias en una zona urbana a una zona rural, siendo mayores en la primera; aunque para que se inicie el fenómeno de carbonatación del concreto, se requiere una pequeña cantidad de concentración de CO₂, que normalmente se encuentra en la atmósfera, que está en el rango de 0.03%.^[16]

La permeabilidad del concreto es otro factor que se debe de controlar, ya que un concreto muy permeable se carbonatará rápidamente, por tener poca resistencia a la penetración de los fluidos. Para obtener un concreto poco permeable son necesarios agregados de buena calidad, una pasta de cemento con relación agua/cemento baja, y la inclusión de puzolanas.^[17]

Así como se indicó, ambos problemas tienen una relación directa con los parámetros meteorológicos del ambiente al cual se encuentran expuestas las estructuras. En México tenemos una diversidad de climas/microclimas que permitirán, con esta investigación definir acertadamente los niveles que causan la corrosión en la estructura. Esto en conjunto con los resultados de las evaluaciones físico-química y electroquímica de los diferentes bloques de concreto expuestos, permitirán definir diseños adecuados para obras de concreto durables, así como reparar las ya existentes y que presentan este problema.

2.5 Diseño de mezclas

El diseño de la mezcla es el proceso de seleccionar los ingredientes adecuados para el concreto y determinar las cantidades relativas, con objeto de producir una mezcla tan durable y económica como sea posible.

Los elementos que intervienen en la elaboración de una mezcla son:

- Cemento
- Agua
- Arena
- Grava
- Aditivo (en algunos casos)

2.5.1. Cemento

El cemento hidráulico se define como un material inorgánico finamente pulverizado, que al agregarle agua tiene la propiedad de fraguar y endurecer en virtud de reacciones químicas durante la hidratación, y que una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad.^[18]

La producción nacional contempla la fabricación de seis clases de cementos hidráulicos con cuatro características y cinco clases de resistencias, que se rige por la Norma Oficial NMX C 414^[19] y la ASTM C 150.^[20]

Tabla 2.2
Clasificación del cemento por sus adiciones

SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
CPO	Cemento Portland ordinario
CPP	Cemento Portland puzolánico
CPEG	Cemento Portland con escoria granulada de alto horno
CPC	Cemento Portland compuesto
CPS	Cemento Portland con humo de sílice
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno

Tabla 2.3
Clasificación por características especiales

SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
RS	Resistente a los sulfatos
BRA	Baja reactividad álcali - agregado
BCH	Bajo calor de hidratación
B	Blanco

Tabla 2.4
Clasificación por su clase resistente

Resistencia N/mm²	Mínimo a 3 días	Mínimo a 28 días	Máximo a 28 días
20	--	20	40
30	--	30	50
30 R	20	30	50
40	--	40	--
40 R	30	40	--

La letra R indica que un cemento es de resistencia inicial alta

2.5.2 Agregados pétreos: arena y grava

Las características y propiedades de los agregados son factores que influyen considerablemente al momento de diseñar una mezcla de concreto, ya que ocupan aproximadamente del 60 al 75 % del volumen del concreto; y del 70 al 85% de su peso, ^[21] determinando el proporcionamiento de la mezcla e influyendo de manera notable en las propiedades físicas y mecánicas del concreto.

En el aspecto físico, los agregados influyen en la durabilidad del concreto en la medida que afectan sus propiedades y su capacidad para resistir los efectos deteriorantes de los medios de contacto, las condiciones ambientales, y las de servicio. En el aspecto químico es importante su composición petrográfica y mineralógica debido a que hay ciertas rocas y minerales que pueden reaccionar adversamente con los álcalis en el concreto. ^[8]

2.5.2.1 Reacción álcali-agregado

El carácter reactivo con los álcalis en los agregados es una condición contingente cuya probabilidad de presentarse depende mucho de su ubicación geográfica. De acuerdo con ello, en las regiones con alta probabilidad de ocurrencia debe ser un requisito indispensable verificar esta característica de los agregados.

El proceso para verificar la reactividad de los agregados con los álcalis; en primer termino, debe efectuarse el examen petrográfico como lo indica la NMX C 265^[71] / ASTM C 295^[72], con objeto de discernir si los agregados son inocuos o contienen rocas y minerales identificados como potencialmente reactivos con los álcalis.

2.5.3 Agua

La calidad del agua que se utiliza para elaborar la mezcla representa un aspecto importante, ya que influye de manera significativa en el comportamiento y propiedades del concreto; el agua que se utiliza debe estar libre de impurezas, como son: grasas, aceites, azúcares, ácidos y materia vegetal, ya que estos impiden o retardan la hidratación.

La Norma Oficial NMX C-122 establece los requisitos de cantidades máximas de impurezas que son tolerables para el agua que se utiliza en la elaboración de mezclas de concreto. Las normas NMX C-252 y NMX C-253 establecen algunos otros requisitos para el caso específico de la fabricación de mezclas para elementos de concreto preesforzado.

2.5.4 Aditivo

Los aditivos según los informes del Comité ACI 212, la ASTM C 494^[22], la ASTM C 1017^[23] y la Norma Oficial NMX C 255, se mezclan con el concreto para cambiar o mejorar sus propiedades, como pueden ser:

- Incrementar la trabajabilidad sin aumentar el contenido de agua o disminuir el contenido de agua a la misma trabajabilidad
- Retardar o acelerar el tiempo de fraguado inicial
- Modifican la rapidez o la capacidad de sangrado
- Reducen la segregación
- Mejoran la bombeabilidad
- Reducen la proporción de la pérdida de revenimiento
- Modifican las propiedades del concreto endurecido, para:
 - ~ Retardar o reducir la evolución de calor
 - ~ Acelerar la rapidez de desarrollo de la resistencia
 - ~ Disminuir la permeabilidad del concreto
 - ~ Incrementar la adherencia entre concreto viejo y nuevo

2.6 Pruebas realizadas al concreto fabricado

Para determinar que el concreto realizado cumple con las características requeridas, se llevan a cabo pruebas de calidad al concreto fresco y endurecido, bajo las normas mexicanas, auxiliados también con las normas de la ASTM.

2.6.1 Pruebas al concreto fresco

Las pruebas que se realizan al concreto fresco son:

- Cohesión y trabajabilidad
- Determinación de la temperatura de la mezcla de concreto
- Revenimiento
- Peso volumétrico
- Contenido de aire
- Sangrado en el concreto
- Curado

2.6.1.1 Cohesión y trabajabilidad

En estado fresco, la característica requerida en las mezclas de concreto es la trabajabilidad, la cual se considera como una propiedad del concreto que determina su capacidad de colocación y compactación adecuadas, permitiendo una buena adherencia y un buen acabado sin que se presente segregación en la mezcla y sin un sangrado excesivo. La consistencia forma parte de la trabajabilidad del concreto, y se relaciona con la cohesividad, de manera que la reunión de ambas propiedades define la facilidad con que una mezcla puede ser trabajada sin que pierda su homogeneidad.

2.6.1.2 Determinación de la temperatura de la mezcla de concreto

Aunque la temperatura ambiental y del concreto recién mezclado están estrechamente vinculadas, no hay una relación estable entre ambas debido a las diversas condiciones térmicas de sus componentes, tal como ocurre en el caso de los agregados cuya temperatura puede variar en función de su humedad y grado de exposición a los rayos solares. De cualquier modo, cuando la temperatura ambiental es alta, la temperatura del concreto al mezclarlo también se incrementa si no se ejercen acciones moderadoras.

Es un hecho reconocido que al aumentar la temperatura inicial del concreto disminuye su resistencia final; es decir, el concreto que se cura inicialmente a temperaturas elevadas desarrolla menor resistencia última, lo cual se atribuye a

que las altas temperaturas alteran la morfología de los productos de hidratación del cemento en detrimento de las propiedades del concreto endurecido.

2.6.1.3 Revenimiento

La prueba de revenimiento muestra la trabajabilidad del concreto, siendo ésta una medición para saber qué tan fácil resulta colocar, manejar y compactar el concreto; cuanto más elevado es el revenimiento, más colocable es la mezcla.

Esta prueba se realiza como lo indica la NMX C 156 y la recomiendan las normas ASTM C 143,^[25] y ASTM C 1362.^[26]

2.6.1.4 Peso volumétrico

La obtención del peso volumétrico del concreto se utiliza para determinar el peso por metro cúbico de concreto. Esta prueba se realiza de acuerdo a la NMX C-162 y como lo recomienda la ASTM C 29,^[27] ASTM C 138,^[28] dividiendo el peso neto del concreto fresco entre el volumen del recipiente que lo contiene.

2.6.1.5 Contenido de aire

El contenido de aire en el concreto fresco compactado es un parámetro muy importante para conocer el comportamiento del concreto a la intemperie, y para verificar la variación del contenido de aire debido al uso de aditivos químicos para incrementar la trabajabilidad del concreto.

Esta prueba proporciona el porcentaje de contenido de aire en el concreto fresco con respecto al volumen del concreto; la medición se basa en el cambio de volumen del concreto sometido a un cambio de presión como lo establecen la NMX C 157^[29] y el método de la ASTM C 231.^[30]

2.6.1.6 Sangrado en el concreto

El sangrado es la migración del agua hacia la superficie del concreto recién mezclado provocada por el asentamiento de los materiales sólidos (cemento, arena y grava) dentro de la mezcla. El asentamiento de estos sólidos es consecuencia del efecto combinado de la vibración y de la gravedad. Un sangrado excesivo aumenta la relación a/c en la parte superior, dando como resultado una capa superior débil, y baja durabilidad.

El método de ensaye de la ASTM C 232^[31] cubre el procedimiento para determinar las cantidades de agua relativas, y de agua de mezclado que sangraran de una muestra de concreto fresco, bajo las condiciones de ensaye.

2.6.1 Curado

Curar el concreto es procurar que en su interior siempre existan condiciones de humedad y temperatura propicias para que todo el cemento que contiene alcance a hidratarse. Cualquier cantidad de cemento que no se hidrate dejará de contribuir al desarrollo de las propiedades del concreto. Tomando en cuenta que la completa hidratación puede requerir meses, e incluso años, resulta improbable disponer de agua interna en todo ese tiempo cuando la estructura opera en condición seca. Por tal motivo, se acostumbra especificar la resistencia de proyecto del concreto a una edad reducida, que normalmente es 28 días, considerando que la gran mayoría de su contenido de cemento del orden del 70 al 80% debe haberse hidratado a esa edad.

Lo anterior presupone el compromiso de asegurar que no le falta agua interna al concreto durante sus primeros 28 días de edad. Para tratar de conseguirlo existen varios procedimientos, que en síntesis se agrupan en dos sistemas de curado húmedo: 1) aportación de agua al concreto desde el exterior a fin de reponer la que se pierde por evaporación y la que se consume por hidratación del cemento, y 2) un cubrimiento temporal de la superficie expuesta del concreto par evitar la pérdida por evaporación del agua interna, confiando que ésta sea suficiente para mantener la hidratación del cemento durante al menos 28 días.

2.6.2 Pruebas al concreto endurecido

Las propiedades críticas del concreto endurecido que intervienen en el desempeño de las estructuras, cuya aportación en forma individual o combinada, ponen a prueba en la mayoría de las condiciones en que prestan servicio.

2.6.2.1 Pruebas de resistencia mecánica

La resistencia mecánica del concreto se refiere básicamente a su capacidad de soportar toda clase de esfuerzos; esta capacidad depende de la resistencia individual de los agregados y la pasta de cemento hidratado, así como y de la integración que se genera entre ambos componentes.

2.6.2.2 Prueba de resistencia mecánica a compresión simple [33] [34] [35]

Esta prueba ayuda a determinar la resistencia a compresión de muestras de concreto cilíndricos; ésta consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros de concreto, esta carga se aplica en pequeñas cantidades hasta el momento que ocurra la falla; la resistencia a la compresión del espécimen se calcula dividiendo la carga máxima soportada durante la prueba entre el área de la sección transversal del cilindro.

2.6.2.3 Prueba de resistencia mecánica a tensión indirecta [34] [36]

La resistencia a la tensión indirecta del concreto se determina por el ensaye de cilindros cargados a compresión en dirección diametral, bajo los criterios de las Normas Oficiales NMX C 159, NMX C 163 y ASTM C 496. [36]

2.6.2.4 Prueba de resistencia mecánica a tensión por flexión [34] [37] [38]

La resistencia del concreto a tensión por flexión esta influenciada por ciertas características y propiedades de los agregados, tales como su dureza y resistencia, textura superficial y forma de partícula; de modo que cuando estas características no son favorables, se dificulta alcanzar altas resistencias a tensión por flexión, aun con el empleo de muy bajas relaciones agua/cemento.

2.6.2.5 Pruebas de deformabilidad

El concreto endurecido experimenta deformaciones debido a esfuerzos progresivos de compresión hasta la falla; estas deformaciones denotan un comportamiento inelástico, excepto en un intervalo inicial de esfuerzos, inferiores a 40-45% de la falla, ^[7] en que ofrece un desempeño semielástico. Esto permite asignarle al concreto un módulo de elasticidad a compresión que depende notablemente de los agregados; las pruebas con las que se puede determinar esta propiedad son:

2.6.2.5.1 Prueba del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson del concreto a compresión ^[39] ^[40]

Esta prueba evalúa la determinación:

- 1 Conforme al modulo de elasticidad de Young
- 2 La relación de Poisson de cilindros de concreto y corazones de concreto, cuando se encuentran bajo tensión de compresión longitudinal

Esta prueba proporciona una tensión para el valor del cociente de tensión, y un cociente lateral para la tensión longitudinal para el concreto endurecido a cualquier edad y en condiciones de curado determinadas. Las pruebas se realizaron, bajo la Norma Oficial NMXC 128 ^[40] y ASTM C 469. ^[39]

2.6.2.5.2 Prueba de contracción por secado del concreto hidráulico ^[41]

La contracción por secado del concreto se origina básicamente en la pasta de cemento conforme endurece y pierde humedad; en tanto que la función de los agregados en este aspecto consiste más bien en restringir la contracción de la pasta.

Una baja gravedad específica, y alta absorción de los agregados son signos de elevada porosidad de las rocas que los constituyen. A su vez, una elevada porosidad de la roca es sintomática de un alto grado de compresibilidad y en consecuencia menor capacidad para restringir la contracción de la pasta de cemento. Por consiguiente, los agregados constituidos por rocas con esas características propician mayor contracción por secado en el concreto.

2.6.2.6 Pruebas de impermeabilidad

7

El concreto debe de resistir por sí mismo la penetración de fluidos líquidos como el agua, soluciones acuosas, fluidos gaseosos como el aire y otros gases; esta propiedad se puede satisfacer si, tenemos un concreto con una baja relación agua/cemento, adicionando a la mezcla de concreto puzolanas y realizando un curado del concreto de calidad; para medir esta propiedad se pueden realizar las siguientes pruebas:

2.6.2.6.1 Prueba de densidad, absorción y vacíos en el concreto ^[42]

Es la propiedad del concreto de poseer una baja permeabilidad a los fluidos; es una condición necesaria para el buen desempeño y durabilidad de las estructuras; es posible evaluar esta propiedad, bajo el criterio de la ASTM C 642, ^[42] que nos ayuda a determinar la densidad, el porcentaje de absorción y el porcentaje de porosidad o vacíos en el concreto endurecido.

La porosidad del concreto se considera como los espacios vacíos que quedan en la masa del concreto a consecuencia de la evaporación del agua excedente al mezclarse, y al aire atrapado durante su fabricación.

2.6.2.6.2 Prueba de absorción capilar

La absorción capilar se considera la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los, espacios capilares cuando el concreto se encuentra en contacto con agua en estado líquido. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua, y por tanto, a los agentes agresivos que se encuentran en el ambiente.

Este método describe la cinética de la absorción del agua en el concreto por medio de tres coeficientes: (**ϵ**) porosidad efectiva; (**k**) absorción capilar; y (**m**) resistencia a la penetración del agua; el valor de **m** esta únicamente en función de la estructura del poro, pero no de la porosidad total, estos tres coeficientes nos dan el valor de la absorción capilar.

2.6.2.6.3 Prueba de resistencia a la penetración de fluidos (ión cloruro) ^[44]

Esta prueba determina la conductancia eléctrica del concreto para proporcionar una indicación rápida de su resistencia a la penetración de iones de cloruro. Esta prueba se puede aplicar a los tipos de concreto donde las correlaciones se han establecido entre esta prueba y procedimientos de acumulación del cloruro a largo plazo, tal como lo describe AASHTO T 259.

2.6.2.6.4 Prueba de resistencia a la congelación y deshielo ^[45]

Esta prueba determina el llamado periodo de inmunidad a la congelación, que corresponde al tiempo o número de ciclos que el concreto puede experimentar congelación y al deshielo sin registrar deterioro. Aunque este periodo de inmunidad no es identificable, con el tiempo de servicio del concreto en condiciones de campo si permite hacer evaluaciones comparativas entre diferentes agregados sometidos a prueba.

Las pruebas que nos ayudan a verificar la aptitud de los agregados al congelamiento y deshielo, son la ASTM C 682 ^[46] y la ASTM C 671. ^[47]

2.6.2.6.5 Pruebas de resistencia superficial

Es la capacidad que tiene el concreto para poder resistir las fuerzas de abrasión, fricción, erosión e impacto pudiendo ser estas de índole mecánico o hidráulico, esta propiedad se determinó bajo los lineamientos de las siguientes pruebas:

- a. Prueba de Resistencia a la Abrasión Mecánica ^{[48] [49] [50]}
- b. Prueba de Resistencia a la Abrasión Hidráulica ^[51]

2.7 Técnicas electroquímicas

Las técnicas experimentales que se utilizan para medir la corrosión en las estructuras son las pruebas electroquímicas, las cuales nos permiten conocer las características físicas y eléctricas del sistema.

2.7.1 Potencial de corrosión (E_{corr} en mV)

Cuando el acero se corroe en el concreto, existe sobre el acero una diferencia de potencial entre las áreas de media celda anódicas y las áreas de media celda catódicas. El potencial de corrosión de media celda puede medirse por comparación con una celda de referencia normalizada, la cual tiene un valor constante conocido ^[6].

El criterio general para interpretar las mediciones de potencial, según la norma ASTM C 876.

Tabla 2.5
Criterio de evaluación de las mediciones de potenciales de media celda^[1]

Potencial de corrosión (E_{corr}) Cu/CuSO ₄	Probabilidad de corrosión
Más negativo que -0.350 v	Mayor del 95%
Más positiva que -0.200 v	Menor del 5%
Valores de -0.200 a -0.350 v	Aproximadamente 50%

2.7.2 Velocidad de corrosión (I_{corr} en $\mu A/cm^2$)

Se llama velocidad de corrosión (I_{corr}) a la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo. Las unidades básicas son g/cm^2 día; aunque la forma usual es

definirla a partir de medidas de tipo electroquímico, transformando este dato a partir de la densidad del metal, en unidades de penetración en (mm/año o mils/year).

2.7.2.1 Intensidad de corriente de corrosión

Es la corriente por unidad de área, de un metal en un medio agresivo (corrosivo), y determinada mediante una técnica electroquímica y con el uso de un potencióstato/galvanostato; generalmente se reporta en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ o A/cm^2 . Para estas pruebas se utilizó el equipo Gcor que emplea la técnica de resistencia a la polarización por el método de corriente confinada, este equipo que puede ser empleado en pruebas de campo sobre estructuras de concreto por que confina el área a medir, su velocidad de corrosión. La resistencia a la polarización es la habilidad de un material a ceder o ganar electrones. Es la facilidad con la cual un metal tiende a sufrir o no corrosión.

La intensidad de corrosión se puede calcular con la siguiente formula.

$$I_{\text{corr}} = \frac{0.026}{R_p}$$

Donde:

I_{corr} = Intensidad de corrosión en ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$, mA/cm^2 o A/cm^2)

0.26 = Constante que se obtiene de las pendientes de Tafel

R_p = Resistencia a la polarización de un metal

La velocidad de corrosión se puede obtener a partir de la intensidad de corrosión multiplicando ésta por un factor que es 11.6, o se puede calcular empleando las leyes de Faraday:

$$I_{\text{corr}} * 11.6 = \frac{\text{mm}}{\text{año}}$$

El objetivo de esta prueba es determinar la velocidad a la cual la estructura pierde sección, por corrosión de la misma.

Tabla 2.6
Criterio de evaluación de la velocidad de corrosión ^[1]

Velocidad de corrosión (i_{corr}) $\mu A/cm^2$	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 - 0.5	Moderado
0.5 - 1	Elevada
> 1	Muy elevada

2.7.3 Resistividad eléctrica [kΩ-cm]

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad; su unidad de medida es el (ohm-cm u ohm-m).

Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del concreto, y en menor grado de la hidratación de la pasta y la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Está en función de variables como: tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, y la porosidad de las estructuras, entre otras.

Tabla 2.7
Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica. ^[1]

Resistividad del concreto (ρ) kΩ.cm	Pronóstico de Corrosión
$\rho > 200$	Poco riesgo
$200 > \rho > 10$	Riesgo moderado
$\rho > 10$	Alto riesgo

2.7.4 Resistencia eléctrica [KΩ]

El método supone que cuando se emplea un material dieléctrico para sellar la superficie del concreto, su resistencia eléctrica es una medida de su impermeabilidad.

El método se puede aplicar a cualquier elemento con una capa impermeabilizada no conductora, previniendo que el acero de refuerzo no contenga ningún recubrimiento epóxico. Debido a que la resistencia es uno de los factores que controlan la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en el concreto.

3 Metodología experimental

Se describe detalladamente el procedimiento a seguir para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos planteados en este trabajo, desde la elaboración de las probetas de estudio, la caracterización del concreto y la evaluación del estado del acero, mientras transcurre el tiempo de exposición.

3.1 Construcción de los especímenes

La construcción de los especímenes para todas las estaciones de campo se realizaron bajo las mismas condiciones, en el mismo lugar con los mismos materiales y en tiempos muy cercanos, con diferencias de tiempo de ocho días aproximadamente.

Se construyeron 12 especímenes de concreto para cada estación, con relaciones $a/c = 0.45$ y 0.65 , así como con acero de refuerzo y sin acero de refuerzo.

Las dimensiones de diseño de todos los bloques de concreto son: 15 cm de ancho; 30 cm; de largo y 15 cm; de altura. Para los que se les colocó acero de refuerzo, el diseño del espécimen con acero de refuerzo es el que se muestra en la Figura 3.1.

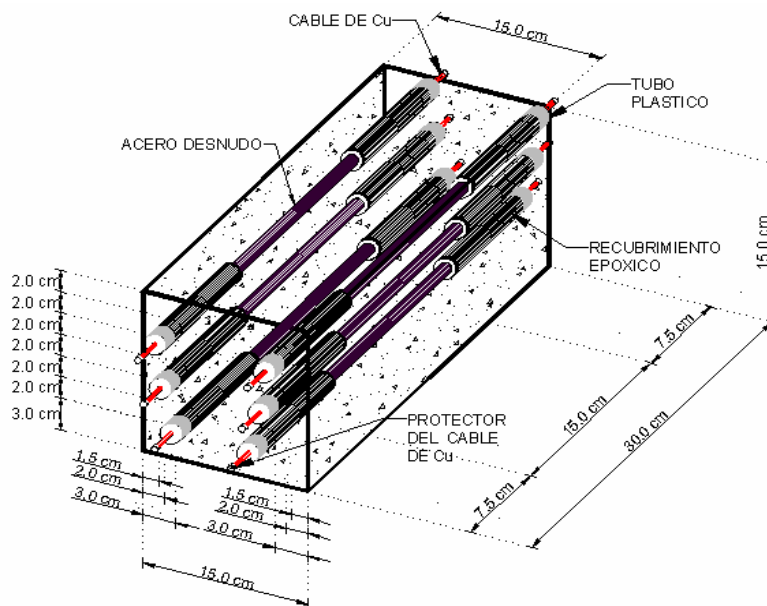


Figura 3.1
Diseño de los especímenes de concreto con acero de refuerzo

Todos los especímenes fueron construidos en el mismo sitio; el Centro Tecnológico del Concreto APASCO, bajo las normas mexicanas de calidad así como con las normas de la ASTM; los materiales utilizados se indican en la tabla 3.2

Tabla 3.2
Materiales utilizados para la construcción de las vigas sin acero

Materiales para los especímenes de concreto simple
Cemento
Agua
Grava
Arena
Aditivo



Figura 3.2
Fabricación de especímenes de concreto sin acero de refuerzo

Para los especímenes con acero de refuerzo, el acero empleado fue del No 3, (3/8" ϕ), con un $f_y = 4\,200\text{ kg/cm}^2$; más adelante se detalla su preparación.

Tabla 3.3.

Materiales utilizados para la construcción de las vigas con acero

Materiales para los especímenes de concreto reforzado
Cemento
Agua
Grava
Arena
Aditivo
Acero de 3/8" ϕ



Figura 3.3

Fabricación de especímenes de concreto reforzado

Como se menciona, todos los especímenes se construyeron bajo las mismas condiciones; la única variante fue el tiempo, ya que se realizaron en siete fechas que se indican en la tabla 3.4, la producción en cada una de las etapas de colado fue aproximadamente de 30 bloques, siendo estos:

- 25 % especímenes con acero de refuerzo, y con una relación $a/c=0.45$
- 25 % especímenes sin acero de refuerzo, y con una relación $a/c=0.45$
- 25 % especímenes con acero de refuerzo, y con una relación $a/c=0.65$
- 25 % especímenes sin acero de refuerzo, y con una relación $a/c=0.65$

De cada una de las mezclas se fabricaron 12 cilindros para realizar las pruebas de: resistencia a la compresión, resistencia a la tensión indirecta, módulo de elasticidad, porosidad y absorción total al concreto endurecido a los 28 y 90 días.

De igual manera en cada una de las etapas se llevaron a cabo pruebas de calidad al concreto fresco como; determinación de la temperatura de la mezcla, revenimiento, peso volumétrico, contenido de aire, cohesión y trabajabilidad, se verificó que el sangrado y el curado se realizara, bajo la norma correspondiente

Los resultados que se reportan son la media de cada mezcla, obteniéndose una media general de todas las mezclas realizadas, así como la desviación estándar para las pruebas en las cuales se presentan resultados de las siete mezclas.

Tabla 3.4
Fechas de elaboración de las mezclas para la fabricación de los especímenes de concreto^[52]

Fecha de elaboración	Día de colado	Número de mezcla
24 de Junio del 2002	01	Mezcla 1
26 de Junio del 2002	02	Mezcla 2
28 de Junio del 2002	03	Mezcla 3
08 de Julio del 2002	04	Mezcla 4
10 de Julio del 2002	05	Mezcla 5
12 de Julio del 2002	06	Mezcla 6
23 de Julio del 2002	07	Mezcla 7

3.1.1 Diseño de la mezcla

El diseño de las mezclas realizó en el Centro Tecnológico del Concreto APASCO, con los materiales que se muestran en la tabla 3.5, cumpliéndose con los requisitos de desempeño bajo la Norma ASTM C192, ^[34] las características y propiedades de los materiales utilizados se describen a continuación:

Tabla 3.5
Tipo de materiales empleados

Material		Procedencia
Cemento	a/c = 0.45	CPO 30 RS de la Planta Orizaba
	a/c = 0.65	
Agua	a/c = 0.45	Potable, red municipal de Toluca, México
	a/c = 0.65	
Arena	a/c = 0.45	Del río Balsas, Lázaro Cárdenas, Michoacán
	a/c = 0.65	
Grava	a/c = 0.45	T.M.A. ½" de Tribasa, Los Reyes, México
	a/c = 0.65	
Aditivo	a/c = 0.45	Sikament 190 CR, de Sika
	a/c = 0.65	

El proporcionamiento que se obtuvo del diseño de las mezclas se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.6
Proporcionamiento de las mezclas para las relaciones a/c=0.45 y a/c=0.65

Contenido (kg/m ³)	Mezcla con relación a/c = 0.45	Mezcla con relación a/c = 0.65
Cemento	411 kg	285 kg
Agua	185 kg	185 kg
Grava	1010 kg	1033 kg
Arena	731 kg	812 kg
Aditivo	4 cc/kg de cto.	4 cc/kg de cto

3.1.1.1 Características y propiedades de los materiales utilizados

3.1.1.1.1 Cemento

El cemento Pórtland hidráulico que se utilizó para la fabricación de los especímenes de concreto fue el CPO 30 RS, el cual tiene las siguientes características:

Tabla 3.7
Características del cemento

Tipo de cemento	clase resistente (N/mm ²)		característica especial
CPO	30		RS
Cemento Pórtland ordinario	Resistencia mecánica a la compresión a los 28 días		Resistente a los sulfatos
	Mín	Máx	
	Más de 306 kg/cm ²	Más de 510 kg/cm ²	

3.1.1.1.2 Agregados pétreos: Arena y Grava

Los agregados empleados para las mezclas con una relación $a/c=0.45$ y $a/c=0.65$, cumplen con las recomendaciones del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, así como con la Norma ASTM C 33 ^[53] “Especificaciones de los Agregados para el Concreto”, que define los requerimientos para evaluar la calidad de los agregados finos y gruesos que se utilizan en la fabricación del concreto, como es el tamaño máximo nominal del agregado, entre otros requerimientos de la Norma Oficial NMX C-111.

3.1.1.1.3 Agua

Fue agua potable procedente de la red local de suministro para uso doméstico y no se le apreció olor, color ni sabor; contiene menos de 2,000 partes de millón (ppm) de sólidos disueltos totales; posee buenos antecedentes de uso en la fabricación de concreto. Así mismo; cumple con los requisitos que establece la Norma Oficial NMX C-122 y la ASTM C 94. ^[13]

3.1.1.1.4 ADITIVO

El aditivo para la elaboración de las mezclas fue el Sikament[®]-190 CR, como un aditivo reductor de agua de rango medio-plastificante de corto retardo.

3.1.2 Preparación del acero de refuerzo

Se colocaron seis tramos de varillas a cada uno de los seis especímenes de las estaciones de campo; el acero utilizado fue del No. 3, (3/8" ϕ), con un $f_y = 4200$ kg/cm², este acero se colocó de forma simétrica a 1.5 cm, 2.0 cm y 3.0 cm de recubrimiento, como se muestra en la figura 3.4.

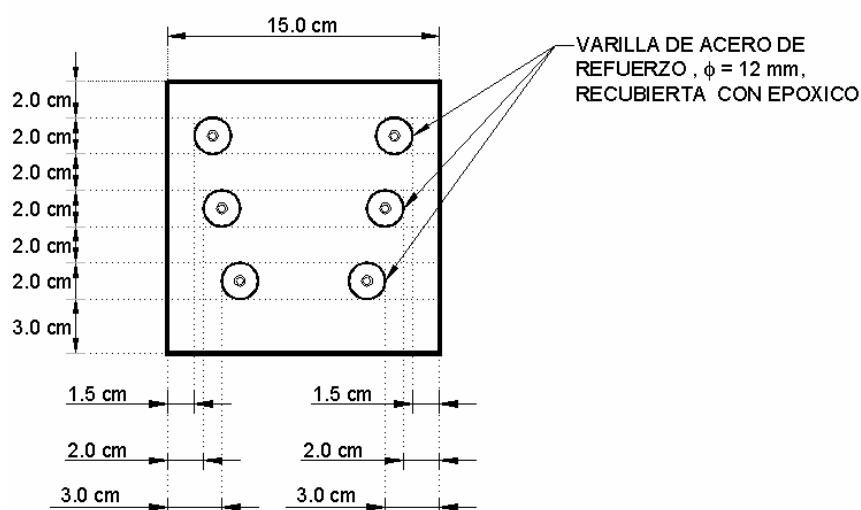


Figura 3.4
Distribución de la colocación del acero de refuerzo en los especímenes

Antes de colocar el acero de refuerzo se hizo una preparación especial, que se describe a continuación:

- Como se mencionó se utilizó acero del No 3 (3/8" ϕ), se cortaron tramos de 45.00 cm, y se limpiaron con un cepillo de alambre (carda) para retirar el poco óxido que pudiera tener, figura 3.5.



Figura 3.5
Tramos 45.00 cm. de varillas de acero

- Las varillas se perforaron en sus extremos, con una broca de 1/16" de diámetro a una profundidad de 1.00 cm ver figura 3.6



Figura 3.6
Perforación de un extremo de la varilla

- Se introdujo en ambos orificios, un cable calibre 12 de 15.00 cm de largo aproximadamente, ver figura 3.7.



Figura 3.7
Introducción y sujeción del cable a la varilla

- Luego se impactaron los extremos con un martillo para ajustar el cable en el orificio ver figura 3.8.



Figura 3.8
Ajuste del cable con la varilla

- Se aisló y se fijó el cable con un producto epóxico haciendo la unión cable/acero, ver figura 3.9.



Figura 3.9
Unión del cable y varilla con un epoxico

- Se limpiaron las varillas con acetona para eliminar grasa o algún otro material con el que se hubiese contaminado
- Se marcaron las varillas en tres secciones de 15.00 cm; el tramo de la parte central de las varillas se protegió totalmente ver figura 3.10; 3.11; y 3.12.

BARRA DE ACERO DE 3/8" DE ϕ

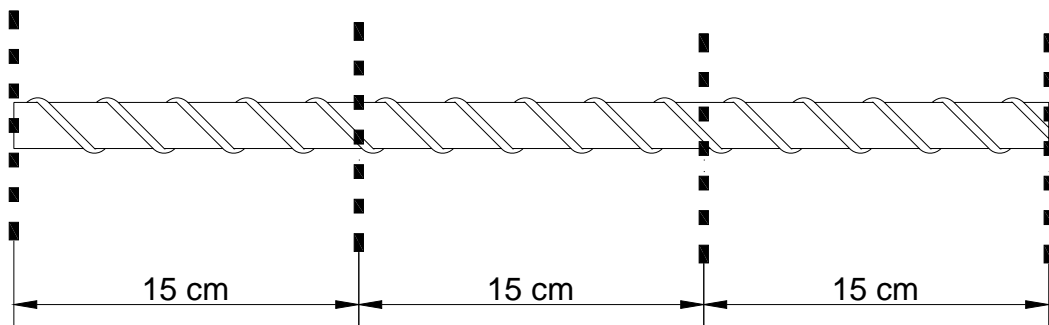


Figura 3.10
Marcado de cada una de las varillas



Figura 3.11
Protección de la parte central de las varillas



Figura 3.12
Protección de la parte central de las varillas

- Se pintaron los tramos de los extremos de las varillas de acero con pintura de aceite, verificándose que no existiera ningún defecto en la pintura aplicada ver figura 3.13.



Figura 3.13
Varillas pintadas en sus extremos

- Una vez que seca la pintura, se colocaron mangueras plásticas transparentes en los extremos, cubriendo aproximadamente una longitud de 10.00 cm de las varillas y 10.00 del cable, protegiendo así la unión cable/acero, ver figura 3.14.



Figura 3.14
Varillas con mangueras plásticas en sus extremos

- Se inyectó Sikaflex 1A en las mangueras, para rellenar el espacio y aislar la conexión cable/acero, ver figura 3.15.



Figura 3.15
Inyección del producto elastomérico

- Una vez que se terminó de rellenar los extremos de las varillas, se retiró la protección que se colocó en la parte central de las varillas, limpiando nuevamente esa superficie, ver figura 3.16.



Figura 3.16.
Limpieza de las varillas

- Terminado el procedimiento, las varillas quedaron listas y se colocaron en moldes que posteriormente fueron colados con concreto; antes de que se expusieran al ambiente, se protegieron las puntas de los cables con pequeñas mangueras ajustables, ver figura 3.17.



Figura 3.17
Varillas colocadas en los moldes

3.1.3 Pruebas realizadas al concreto fresco

Las pruebas que se le realizaron al concreto fresco fueron:

- a. Cohesión y trabajabilidad
- b. Determinación de la temperatura de la mezcla de concreto
- c. Revenimiento
- d. Peso Volumétrico
- e. Contenido de aire
- f. Sangrado en el concreto
- g. Curado

3.1.3.1 Cohesión y trabajabilidad

En las mezclas de concreto elaboradas, la consistencia se identificó con la fluidez y la manejabilidad, la cual se relaciona con la cohesividad, de manera que la reunión de ambas propiedades definen la facilidad con que la mezcla pudo ser trabajable, sin pérdida de su homogeneidad.



Figura 3.18
Buena trabajabilidad de la mezcla, y elevada cohesión

3.1.3.2 Determinación de la temperatura de la mezcla de concreto

Esta determinación se realizó bajo el criterio de la norma ASTM C 1064,^[24] midiendo la temperatura del concreto recién mezclado durante todo el proceso de fabricación de las mezclas.



Figura 3.19
Verificación de la temperatura de la mezcla

3.1.3.3 Revenimiento

Se determina la fluidez del concreto fresco por el método del asentamiento del cono de Abrams.



Figura 3.20
Realización de la prueba de revenimiento

3.1.3.4 Peso volumétrico

Se hace el llenado del recipiente, se pesa, se obtiene el peso neto de concreto fresco y éste se divide entre el volumen del recipiente, obteniendo así el peso volumétrico del concreto fresco



Figura 3.21
Prueba de peso volumétrico de la mezcla

3.1.3.5 Contenido de aire

el contenido de aire del concreto fresco, Se determina con base en la medición del cambio de volumen del concreto sometido a un cambio de presión. El equipo que se especifica para este ensayo es un aparato tipo Washington, el cual cuenta con un manómetro que registra directamente el contenido de aire, en (%), con respecto al volumen de concreto.



Figura 3.22
Determinación del contenido de aire

3.1.3.6 Sangrado en el concreto

En esta prueba se determinan las cantidades de agua relativas en la muestra de concreto fresco, bajo las condiciones de ensayo



Figura 3.23
Vibración de los especímenes sobre una mesa vibratoria

3.1.3.7 Curado

Curar adecuadamente el concreto NMX C 159 ^[32] es procurar que en su interior siempre existan condiciones de humedad y temperatura adecuadas para que todo el cemento que contiene la mezcla alcance a hidratarse; esta acción es necesaria para desarrollar las propiedades deseadas del concreto.



Figura 3.24
Colocación de una membrana plástica para evitar pérdida de humedad

El procedimiento para curar los especímenes de concreto fue la aportación de agua al concreto desde el exterior, así como un cubrimiento temporal (membrana) en la superficie expuesta del concreto que retiene la humedad, ASTM 309, ^[55]

todos ellos colocados en un cuarto húmedo durante 28 días, como lo indica el método de la norma ASTM C192. ^[34]



Figura 3.25
Especímenes colocados en un cuarto húmedo durante 28 días

3.1.4 Pruebas realizadas al concreto endurecido

3.1.4.1 Prueba de resistencia mecánica a compresión simple

Las pruebas de resistencia mecánica a compresión simple se realizaron de acuerdo con la Norma Oficial NMX C 159, y la NMX C 83, ^[35] así como la ASTM C 39 ^[33] y ASTM C 192. ^[34]



Figura 3.26
Elaboración de especímenes para la prueba de resistencia a la compresión

3.1.4.2 Prueba de resistencia mecánica a tensión indirecta



Figura 3.27
Especímen sometido a la prueba de tensión indirecta

3.1.4.3 Prueba del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson del concreto a compresión

3.1.4.4 Prueba de Densidad, Absorción y Vacíos

Las pruebas que se realizaron fueron:

- Absorción después de inmersión
- Absorción después de inmersión y ebullición. Absorción total
- Porosidad Total
- Prueba de Absorción Capilar

Se determino la absorción capilar por el método de ensayo de Fagerlund. ^[43]

3.1.4.4.1 Método de ensayo de Fagerlund.

Coeficiente de la resistencia a la penetración del agua (**m**)

$$m = \frac{t}{z^2} \quad (\text{seg} / \text{m}^2)$$

t = tiempo en que el agua penetra a una profundidad z
z = profundidad de penetración del agua

Coeficiente de absorción capilar (**k**)

$$k = \frac{(W_t - W_0) / A}{\sqrt{t}} \quad (\text{kg} / \text{m}^2 \text{s}^{1/2})$$

Wo = peso inicial de la probeta (kg)
Wt = peso final de la probeta (kg)
A = área expuesta de la probeta (m)

Coeficiente de porosidad efectiva (ϵ_e)

$$\epsilon_e = \frac{k\sqrt{m}}{1000} \quad (\%)$$

m = coeficiente de la resistencia a la penetración del agua

k = coeficiente de absorción capilar

3.1.4.4.2 Absorción capilar (S)

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (m/s^{1/2})$$

3.2 Identificación de los especímenes

Después de terminados todos los especímenes, a cada uno de ellos se les dio una clasificación dependiendo de la fecha de colado, su relación a/c, entre otras.

- La clave de identificación para los especímenes con acero de refuerzo quedo de la siguiente manera:

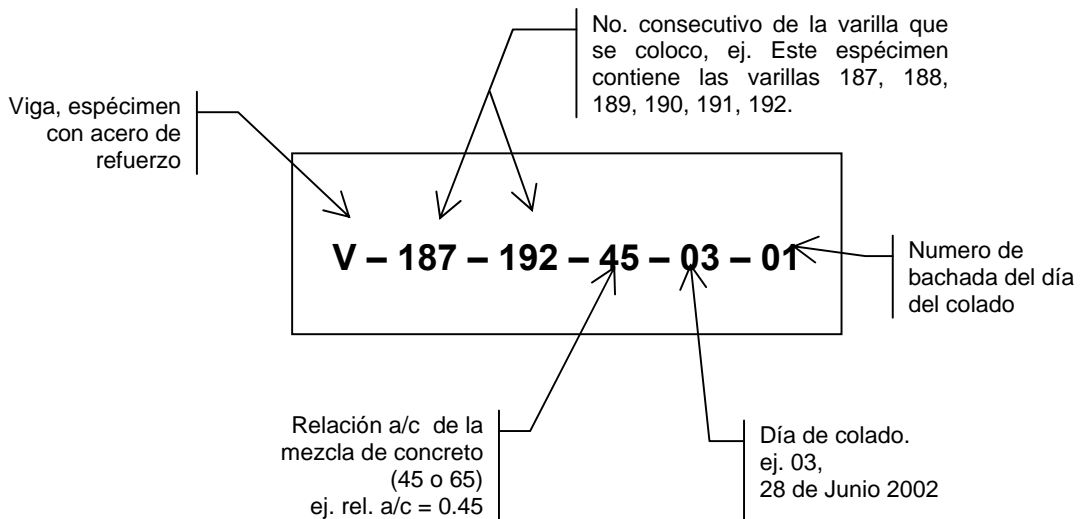


Figura 3.28
Identificación del espécimen de concreto con acero de refuerzo

- La clave de identificación para los especímenes sin acero de refuerzo fue de la siguiente manera:

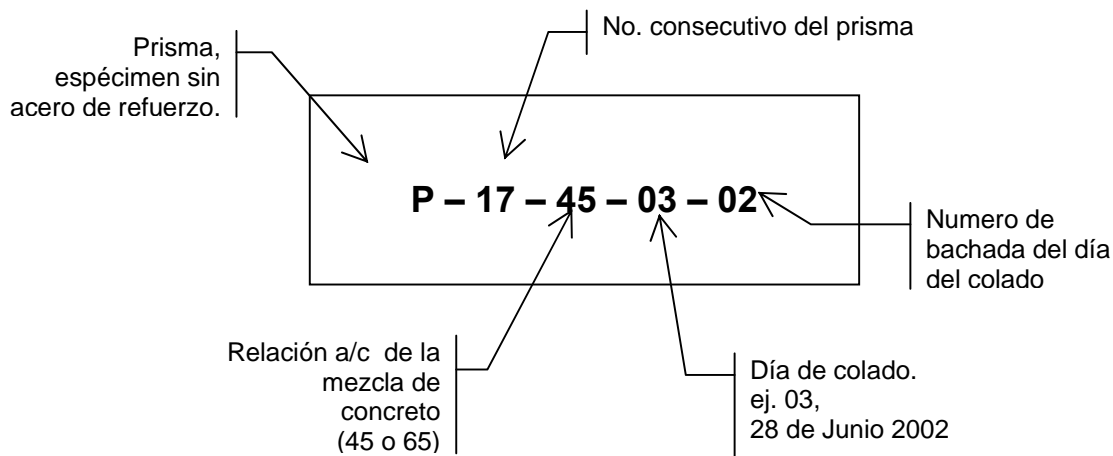


Figura 3.29
Identificación del espécimen de concreto simple

3.3 Construcción de las estaciones de campo

Para desarrollar la parte experimental referente a los procesos de carbonatación, penetración de cloruros en el concreto; la determinación del contenido crítico de cloruros de inicio de corrosión; así como la medida de parámetros electroquímicos que permitirán evaluar la cinética de la corrosión en la infraestructura de concreto, expuesta a diferentes ambientes urbanos, se colocaron estaciones de campo ver figura 3.30, las cuales están conformadas por los siguientes elementos:

- 1 Recolector de sólidos insolubles, que sirve para captar la lluvia y poder medir el pH del agua, así como las partículas suspendidas en la atmósfera
- 1 Vela húmeda, que mide cloruros en la atmósfera, ver figura 3.31
- 1 Vela de plomo, la cual sirve para medir SO₂ en la atmósfera, ver figura 3.32
- 12 Especímenes de concreto, tabla 3.7

Tabla 3.7
Características de los especímenes de concreto colocados en las estaciones de campo.

Cantidad de Especímenes	Características	
3	Con relación $a/c = 0.45$	Con acero de refuerzo
3	Con relación $a/c = 0.65$	Con acero de refuerzo
3	Con relación $a/c = 0.45$	Sin acero de refuerzo
3	Con relación $a/c = 0.65$	Sin acero de refuerzo
12	Total	



Figura 3.30
Estación de campo, Toluca (Mx9)



Figura 3.31
Vela húmeda, Querétaro (Mx8)



Figura 3.32
Vela de plomo, Querétaro (Mx8)

Así mismo se recomendó que dicha estación de campo se ubicara cerca de una estación meteorológica ver figura 3.33, para obtener los datos de Temperatura Promedio, Humedad Relativa, Tiempo de Humectación, Precipitación Pluvial, Velocidad del Viento, Dirección del Viento, Sensor de Radiación Solar, Insolación, Compuestos de Azufre, Cloruros y Dióxido de Carbono en el ambiente, para obtener una mejor confiabilidad de datos.



Figura 3.33
Estación meteorológica, CNA Querétaro (Mx8)

3.4 Ubicación de los especímenes en la estación de campo

Los especímenes se colocaron en una base construida con unos paneles metálicos, a 1.20 m de altura sobre el nivel del suelo, como se muestra en la figura 3.34. y 3.35, orientando una de las caras (C1) de cada espécimen en la dirección de los vientos predominantes del lugar, la cara de la dirección del colado se colocó como base, ver figura 3.36.



Figura 3.34
Instalación de la Estación de Campo, Querétaro (Mx8)



Figura 3.35
Colocación de los especímenes, Querétaro (Mx8)

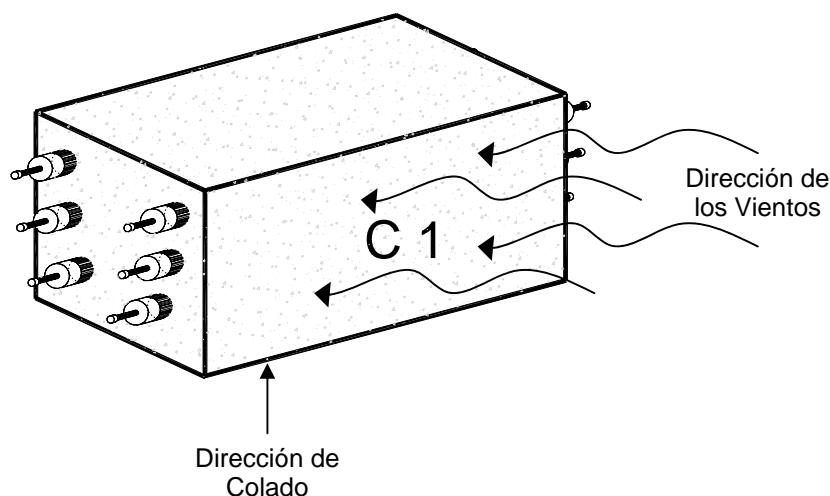


Figura 3.36.
Colocación del espécimen en la estación de campo.

3.5 Monitoreo de las estaciones de campo

El proyecto considera aproximadamente cuatro años de exposición de dichos especímenes; durante este tiempo se realizarán periódicamente pruebas, divididas en dos grupos; pruebas realizadas a los especímenes con acero de refuerzo y pruebas realizadas a los especímenes sin acero de refuerzo, ambas pruebas se describen a continuación:

3.5.1. Pruebas realizadas a los especímenes de concreto con acero de refuerzo. (Pruebas electroquímicas)

Las mediciones que se realizaron a estos especímenes son:

- Potenciales de corrosión
- Velocidad de corrosión
- Resistividad eléctrica
- Resistencia eléctrica

3.5.1.1 PROCEDIMIENTO DE LAS MEDICIONES ELECTROQUÍMICAS

Estas pruebas se realizan en todos los casos con el equipo GECOR6, cuyas características son:

El equipo GECOR6 determina la velocidad instantánea de corrosión en estructuras de concreto reforzado, utilizando para ello la técnica de la Resistencia de Polarización aplicada mediante el confinamiento de la señal. Las medidas se llevan a cabo de forma automática, en un tiempo de 2 a 5 minutos.

El corrosímetro GECOR6 está compuesto por tres elementos principales:

- La unidad de medida LG-ECM-06, que alberga el microprocesador para control del sistema
- El sensor LG-ECS-06A para la medida de la intensidad de corrosión. Este sensor contiene tres electrodos de cobre/sulfato de cobre, un contraelectrodo central y un contraelectrodo exterior; ambos de acero inoxidable. Permite también la medida del potencial de corrosión en las estructuras
- El sensor LG-ECS-06B sirve para medir la resistividad eléctrica del concreto. Este sensor contiene un electrodo de cobre/sulfato de cobre y un contraelectrodo de acero inoxidable

El procedimiento de realización de las mediciones es el siguiente:

- Se satura la superficie con agua potable a todos los especímenes con acero de refuerzo.



Figura 3.37
Preparación del espécimen para la realización de las mediciones electroquímicas

- Se inicia con las mediciones de cada espécimen con la Cara Expuesta (C1), comenzando con la varilla con 3.00 de recubrimiento, enseguida la de 2.00 cm, y se termina con la de 1.5 cm

- Se continua con la Cara Resguardada (C2), comenzando de forma inversa, primero con la de 1.5 cm, 2.0 cm, y finalizando con la de 3.00 cm.



Figura 3.38
Mediciones electroquímicas

- Se realiza el registro de las mediciones en una bitácora y se continúa así con los siguientes especímenes

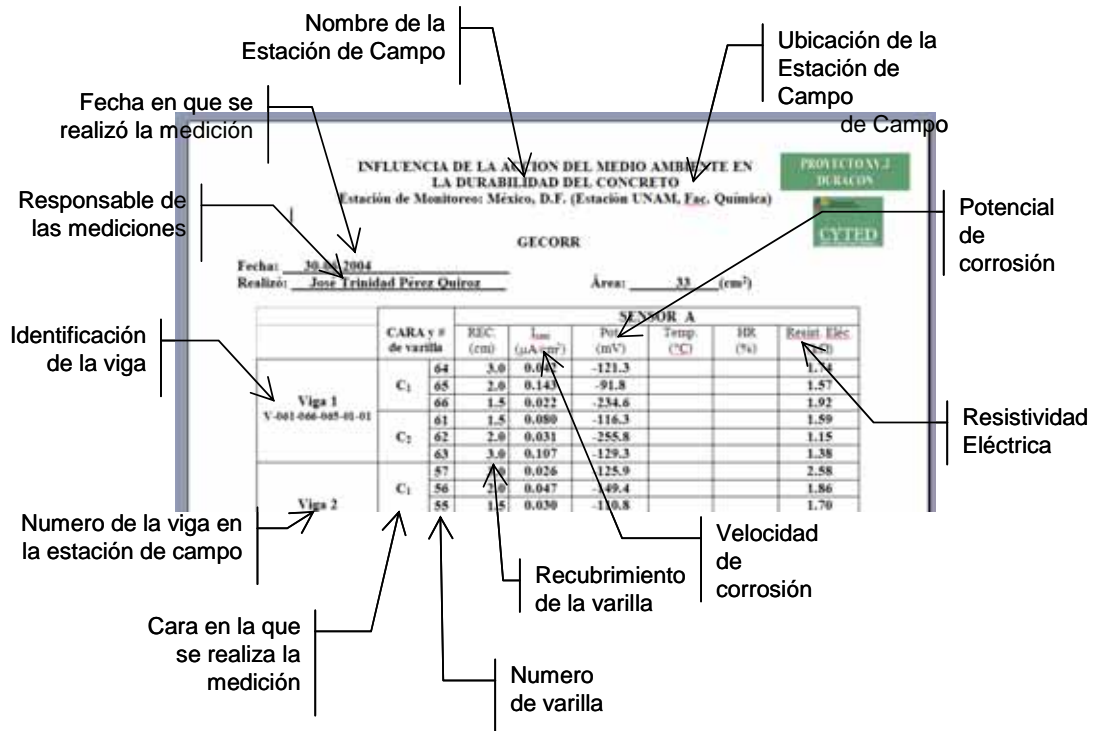


Figura 3.39
Formato para el registro de los datos electroquímicos por estación

Las pruebas están programadas aproximadamente cada mes, pero depende de gran medida de la disponibilidad de recursos humanos.

Todos los datos obtenidos se concentran en una base de datos y se van actualizando mes a mes, generándose graficas de:

- Potencial de corrosión. [E_{corr} (mV)]
- Velocidad de corrosión. [I_{corr} (µA/cm²)]
- Resistividad eléctrica. [(Ω -cm)]

Se generaron seis graficas para cada una de las pruebas, se realiza una grafica para todos los especimenes con un mismo espesor y de la misma cara.

3.5.2. Pruebas realizadas a los especimenes de concreto sin acero de refuerzo

Con los especimenes de concreto que no contienen acero de refuerzo se podrá determinar el perfil de cloruros, la resistividad, y la profundidad de carbonatación. Los periodos de ensayo a los especimenes son aproximadamente a los 12, 24, 36, 48 meses, de haberse colocado las muestras en las estaciones de campo.

3.5.2.1 Determinación de la profundidad de carbonatación. e_{CO_2}

Como se mencionó en el capítulo anterior, la carbonatación es la reducción de la alcalinidad normal del concreto por efecto de CO_2 que difunde desde el medio ambiente que lo rodea. En presencia de humedad, el CO_2 reacciona con los álcalis, neutralizándolos para formar carbonatos disminuyendo el pH por debajo de 10.

El objetivo de esta prueba es determinar el avance de la carbonatación del concreto por el método de vía húmeda, con solución de indicador ácido-base. [64]
[65]

Esta prueba como se menciona se realizó a los especímenes que no tienen acero de refuerzo que fueron colocados en la estación de campo junto con los especímenes con acero de refuerzo, esta prueba se realizara aproximadamente a cada año de exposición, ver figura 3.40.



Figura 3.40
Especímen expuesto con un primer corte

La sección que se necesita para esta determinación es un corte transversal de aproximadamente 5.00 cm de espesor, ver figura 3.41.

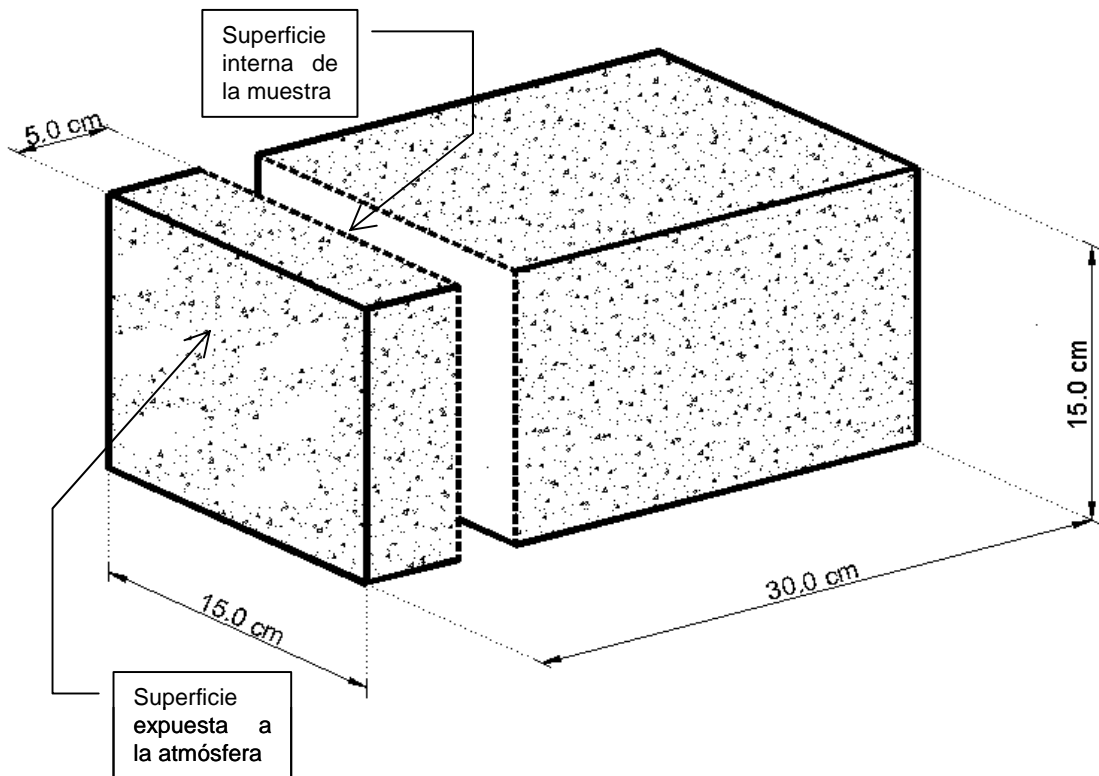


Figura 3.41
Diseño de corte para la medición de profundidad de carbonatación

Este corte debe realizarse en seco, con una cortadora diseñada especialmente para esta prueba, como se muestra en la figura 3.42.



Figura 3.42
Corte del espécimen de concreto

Después de realizado el corte, se retira de la cara interna del corte todo el material que queda suelto o polvo de la superficie. Después se le aplica con un atomizador de forma uniforme a la cara interna del corte el indicador ácido- base, no siendo este tiempo mayor de 15 minutos entre el tiempo de corte y el tiempo de la aplicación. El indicador utilizado es la fenolftaleína.



Figura 3.43
Limpieza de la superficie de la probeta

Posteriormente sin que todo este procedimiento tarde más de 20 minutos se etiqueta perfectamente la muestra, se protege del ambiente para poder transportarlas al laboratorio donde se realizarán otras mediciones de precisión y prepararlas para las pruebas que posteriormente se realizaran.



Figura 3.44
Rociado de la cara recién cortada con fenolftaleína

En laboratorio, a las muestras se les realizan tres mediciones de precisión de cada uno de sus lados con un vernier digital, se hace un registro de cada muestra y posteriormente se obtiene un valor promedio de cada lado para la relación a/c que corresponde.

Con los datos generados obtenemos profundidad de carbonatación e_{CO_2} , en unidades de milímetros.

3.5.2.2. Determinación de la velocidad de carbonatación K

Para predecir la velocidad de carbonatación del concreto reforzado se tiene la ecuación que relaciona la profundidad de carbonatación con la raíz cuadrada del tiempo de exposición

$$K_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}}{\sqrt{t}}$$

X_{CO_2} = Profundidad de carbonatación, mm

K_{CO_2} = Constante de carbonatación, mm . año^{0.5}

t = Tiempo en años

De cada estación de campo se obtiene un registro y se calcula la velocidad de carbonatación, para la cara expuesta (C1) y la cara resguardada (C2).

Tabla 3.8
Registro de datos de carbonatación

Estación	Relación de la mezcla a/c	Fecha de instilación de la Estación	Fecha del 2º. Corte	Resultados de Profundidad de Carbonatación 2o. CORTE e_{CO_2} (Promedio)				Días Trans.	Tiempo en años t	Vel. de carb. K (mm/a ^{1/2})	
				Cara Exp. C1 (mm)	Cara Resg. C2 (mm)	Arriba (mm)	Abajo (mm)			C1	C2
TOLUCA	0.45	01/05/2003	21/06/2005	3.54	2.23	0.90	2.01	782.00	2.14	2.41	1.52
	0.65			8.63	8.37	5.97	6.60			5.89	5.72

3.5.2.3 Preparación de las muestras para la determinación de la concentración de cloruros en el concreto

El presente trabajo no incluye el análisis de los valores de la concentración de cloruros en el concreto; sólo se menciona porque forma parte integral del proyecto.

El objetivo de esta prueba es determinar la concentración de los cloruros, totales y libres, presentes en la masa de concreto, a diferentes niveles de profundidad;

estos resultados permitirán calcular el coeficiente de difusión aparente del cloruro hacia el interior, y con ello la velocidad de penetración del mismo en el tiempo. Esta información, interrelacionada con otras variables, permitirá analizar el estado actual de la estructura, y también estimar el tiempo que tardará el ión cloruro en alcanzar el acero de refuerzo.

Los cloruros totales: están representados por la sumatoria del cloruro enlazado y el cloruro libre.

Los cloruros libres: son los solubles en agua; y éstos son los que representan un riesgo para el acero de refuerzo al alcanzar niveles críticos y causar su despasivación.

El cloruro enlazado: este es el cloruro combinado con las diferentes fases o compuestos de la pasta de cemento; de los cuales, el principal es el aluminato tricálcico.

El coeficiente de difusión aparente (D_{ap}). Permite conocer la resistencia a la penetración del cloruro en el concreto. También se puede estimar el tiempo aproximado en el cual estos iones llegan a nivel del acero de refuerzo, en cantidad suficiente para inducir su corrosión.

La determinación de los cloruros totales puede determinarse con el método ASTM C 1152 ^[56] y la determinación de los cloruros solubles, puede ser efectuada de acuerdo con el método ASTM C 1411. ^[57]

Los valores del contenido de cloruro dan una idea del grado de contaminación y de la evolución posible del daño, pero no se puede tomar como un límite absoluto.

Para este proyecto, la realización de las pruebas se realizará con las muestras que se obtienen de la medición de la profundidad de carbonatación, estas muestras se preparan de la siguiente manera:

Cada muestra está identificada por cada uno de sus lados, la cara expuesta (**C1**), la cara resguardada (**C2**), la parte de abajo y la parte de arriba, a cada muestra se le realizan los siguientes cortes, ver figura 3.45, iniciando por la parte de abajo, se le corta una fracción de 2.5 cm de concreto; esta parte se desecha al igual que la parte superior; las fracciones de concreto que se utilizan son las siguientes, se realizan tres cortes de 2.5 cm cada uno de ellos, utilizando los primeros dos para la prueba de concentración de cloruros ver figura 3.47 y la tercera para la prueba de resistividad eléctrica en el concreto ver figura 3.49.

La muestra queda dividida como se presenta en la siguiente figura:

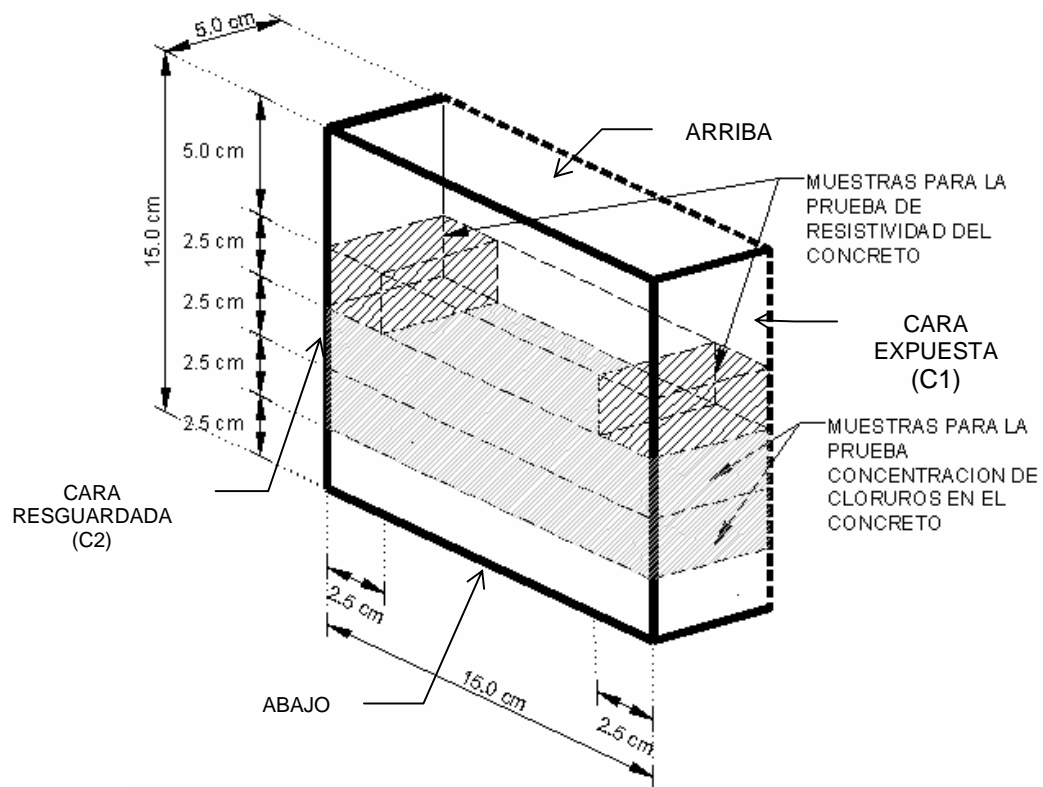


Figura 3.45
Esquema para la extracción de las muestras

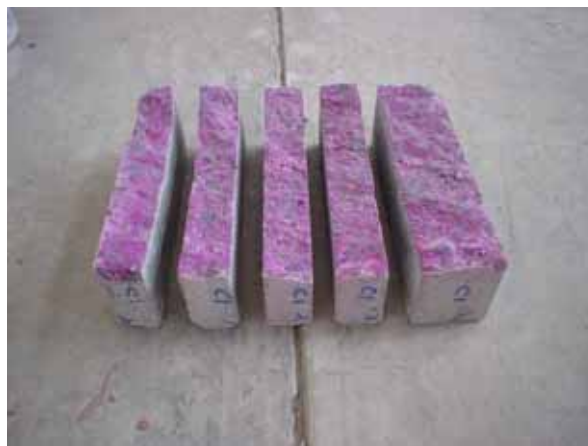


Figura 3.46
Cortes realizados para las pruebas de laboratorio

Se toman las dos primeras partes para la prueba de concentración de cloruros, y se realizan los cortes como lo muestra la figura 3.48.

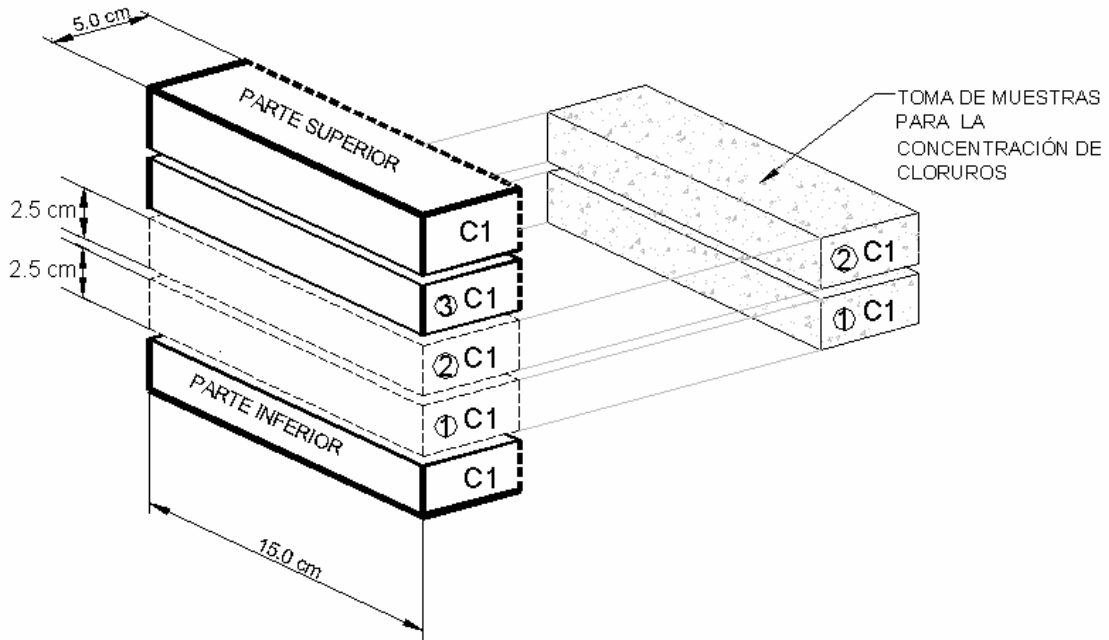


Figura 3.47

Esquema de la extracción de las muestras para la prueba de concentración de cloruros

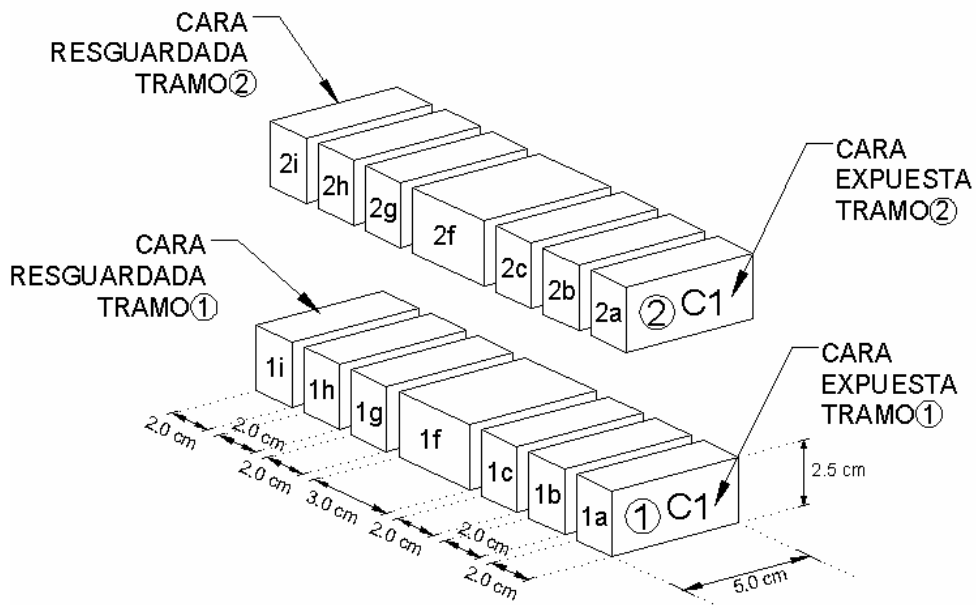


Figura 3.48

Diagrama de cortes para la prueba de concentración de cloruros

3.5.2.4 Preparación de las muestras para la determinación de la resistividad eléctrica en el concreto

Para la realización de esta prueba se utilizó de igual manera la muestra que se ocupó para la medición de carbonatación, como se especifica en la figura 3.45; los “núcleos” se tomaron de la sección número 3 como lo muestra la siguiente figura:

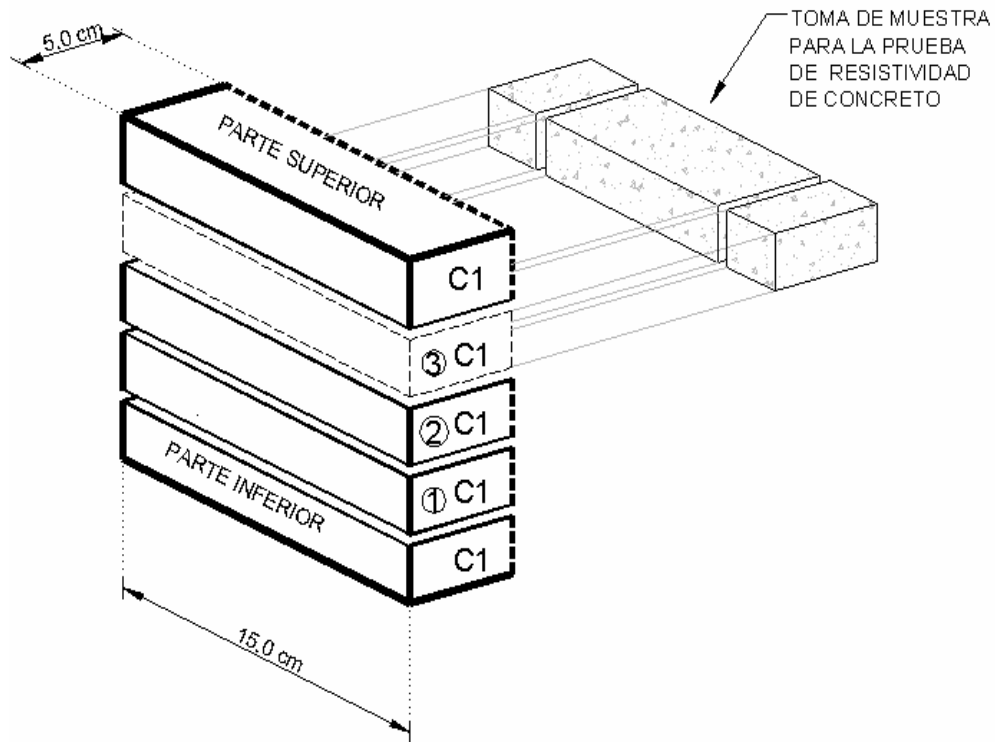


Figura 3.49
Extracción de la muestra para la prueba de resistividad eléctrica en el concreto

Dado que la resistividad es función de la humedad, para la extracción de estos núcleos se utilizó un flujo mínimo de agua, resguardándolos perfectamente hasta que se efectúe la prueba.

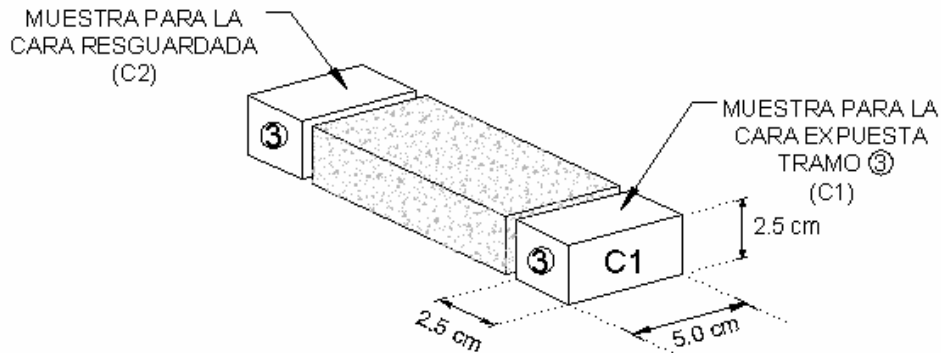


Figura 3.50
Preparación e identificación de las muestras para la prueba de resistividad eléctrica

El núcleo se ajusta quedando con las siguientes dimensiones: 2.5 cm x 2.5 cm x 2.5 cm para poder tener una dimensión de área conocida, ya que de la parte donde se realiza el primer corte, queda un tanto irregular.

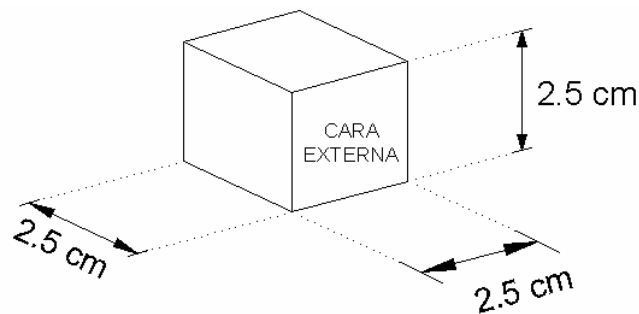


Figura 3.51
Muestra para la prueba de resistividad eléctrica

Aunque los resultados de esta prueba no se presentan en este trabajo, sólo mencionaremos el procedimiento de cómo se efectúa la prueba, ya que forma parte del proyecto general.

Mediante una fuente, y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales de la muestra, se somete éste a una corriente dada, (I), y se registra el voltaje (E). La resistencia eléctrica (Re), se calcula como E/I y se expresa en ohm. De esta manera la resistividad eléctrica está dada por:

$$\rho = R_e \left(\frac{A}{L} \right) \text{ ohm - cm}$$

Donde:

A = área transversal del espécimen.
L = longitud del espécimen.

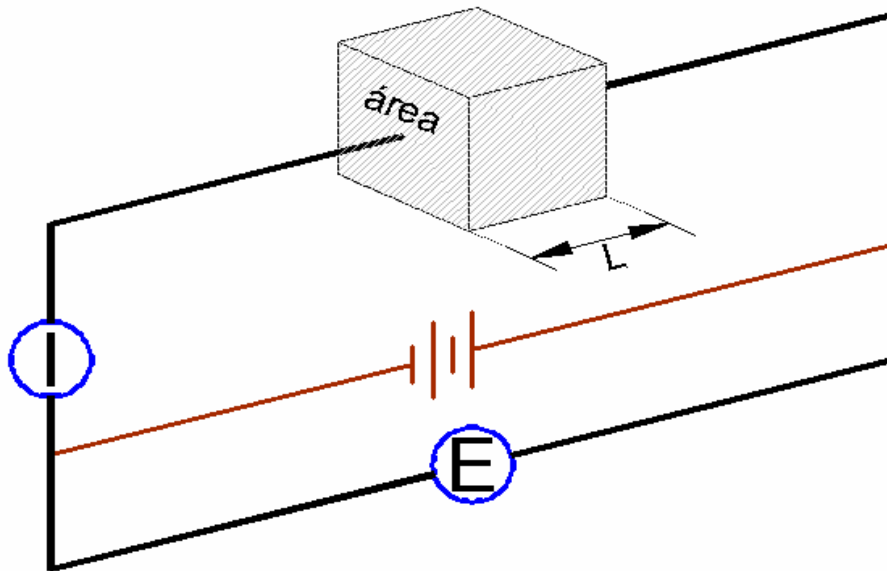


Figura 3.52
Montaje de la prueba de resistividad eléctrica

4 Resultados

4.1 Resultados de los materiales utilizados

4.1.1 Composición química del cemento utilizado

El cemento podemos dividirlo en dos: componentes principales y compuestos menores.

Componentes principales: Silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico, y aluminoferrito terracálcico.

Compuestos menores: óxidos de magnesio, de titanio, de manganeso, de potasio y de sodio. Estos últimos permiten que se alcance una alta alcalinidad ($\text{pH} > 12.5$).

Tabla 4.1
Análisis químico del cemento tipo CPO 30 RS ^[58]

Composición química	Relación a/c = 0.45	Relación a/c = 0.65
P. Ignición	2.92	2.92
SiO ₂	21.38	21.38
Al ₂ O ₃	4.22	4.22
Fe ₂ O ₃	4.54	4.54
CaO	63.37	63.37
MgO	1.51	1.51
Na ₂ O	0.16	0.16
K ₂ O	0.53	0.53
SO ₃	2.32	2.32
Total	100.95	100.95
R. insoluble	0.54	0.54
CaOL	0.66	0.66
Mineralogía		
C ₃ S	54.0	54.0
C ₂ S	20.50	20.50
C ₄ AF	13.80	13.80
C ₃ A	3.50	3.50
Álcalis totales	0.51	0.51

4.1.2 Estudio petrográfico del agregado fino^[59]

Datos de campo del agregado fino:

Muestra: Arena río Balsas, Lázaro Cárdenas.

Colector: Cementos APASCO S.A. de C.V.

Localidad: Arena del Río Balsas, Lázaro Cárdenas, Michoacán



Figura 4.1
Arena a utilizar apilada

Tabla 4.2
Descripción macroscópica

	Descripción
Color:	Gris a gris oscuro
Textura:	Arenosa
Minerales observables:	Fragmentos angulosos de rocas ígneas de composición andesítica, cristales de feldspatos, cuarzo y ferromagnesianos; el tamaño es de arena fina a media

Tabla 4.3
Descripción microscópica

	Descripción	
Textura:	Arenosa	
Mineralogía:	Se observan fragmentos angulares de rocas ígneas extrusivas ligeramente oxidadas, de composición:	
	Andesítica	49%
	Fragmentos de cuarcitas	20%
	Cristales de cuarzo ígneo y metamórfico	15%
	Plagioclasa de composición sódico-cálcica	10%
	Piroxenos y anfíboles	5%
	Cristales de magnetita	1%

Observaciones

La muestra está conformada por un agregado de fragmentos angulares a semiredondeados de rocas volcánicas, de rocas metamórficas cuarcíticas y de cristales de cuarzo, provenientes de la defragmentación de rocas ígneas y metamórficas; el tamaño es de arena fina a mediana; estos fragmentos provienen de una región conformada por rocas ígneas y metamórficas.

Clasificación.

Arena de fragmentos de rocas y de cristales.

4.1.3 Prueba de reactividad potencial de los agregados con los álcalis del cemento por el método químico, según las Normas NMX C 271 y ASTM C 289^[60]

Esta prueba ayuda a determinar la reactividad potencial (método químico) de agregados con los álcalis en el concreto del cemento Pórtland, según lo indicado por la cantidad de reacción durante 24 hrs a 80°C entre una solución de hidróxido de sodio a 1 N y el agregado.

4.1.3.1 Determinación de la reactividad potencial del agregado fino

Tabla 4.4
Resultados de la prueba del agregado fino^[61]

Tipo de agregado	Sílice disuelta (Sc) milimoles / litro	Reducción en alcalinidad (Rc) milimoles / litro	Resultado
ARENA 5 mm RÍO BALSAS	67	130	AGREGADO INOCUO
	66	130	
	66	130	

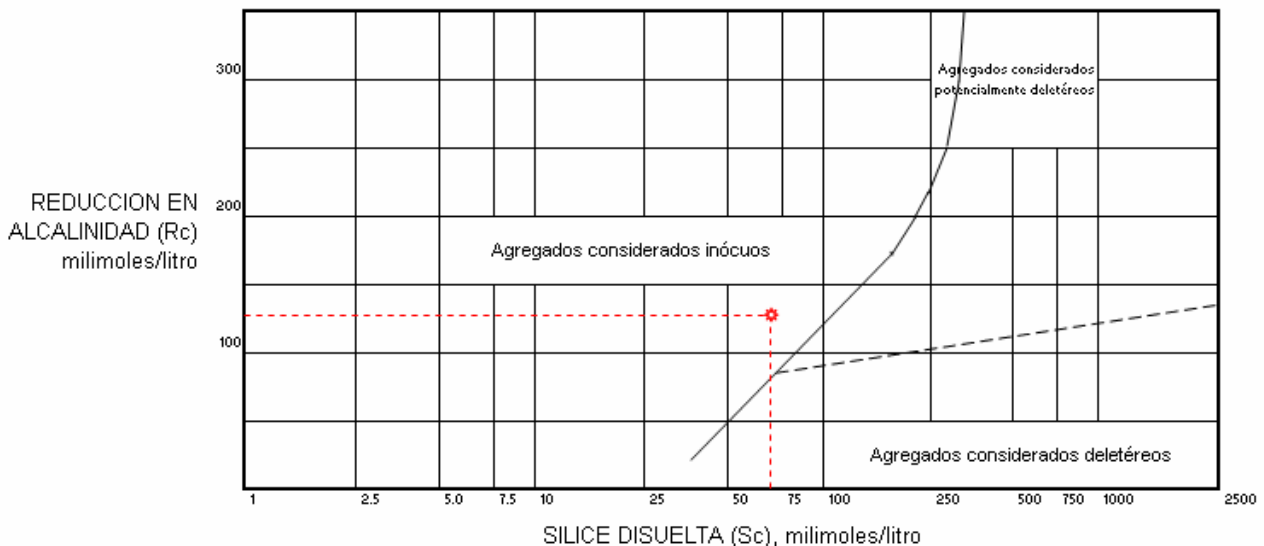


Figura 4.2
Prueba de reactividad potencial del agregado fino con los álcalis del cemento

4.1.3.2 Determinación de la reactividad potencial del agregado grueso

Tabla 4.5
Resultados de la prueba del agregado grueso^[62]

Tipo de agregado	Sílice disuelta (Sc) milimoles / litro	reducción en alcalinidad (Rc) milimoles / litro	Resultado
MUESTRA No.4 BASALTO PROV. TRIBASA BCO. ATLIPAC	22	40	AGREGADO INOCUO
	22	40	
	22	40	

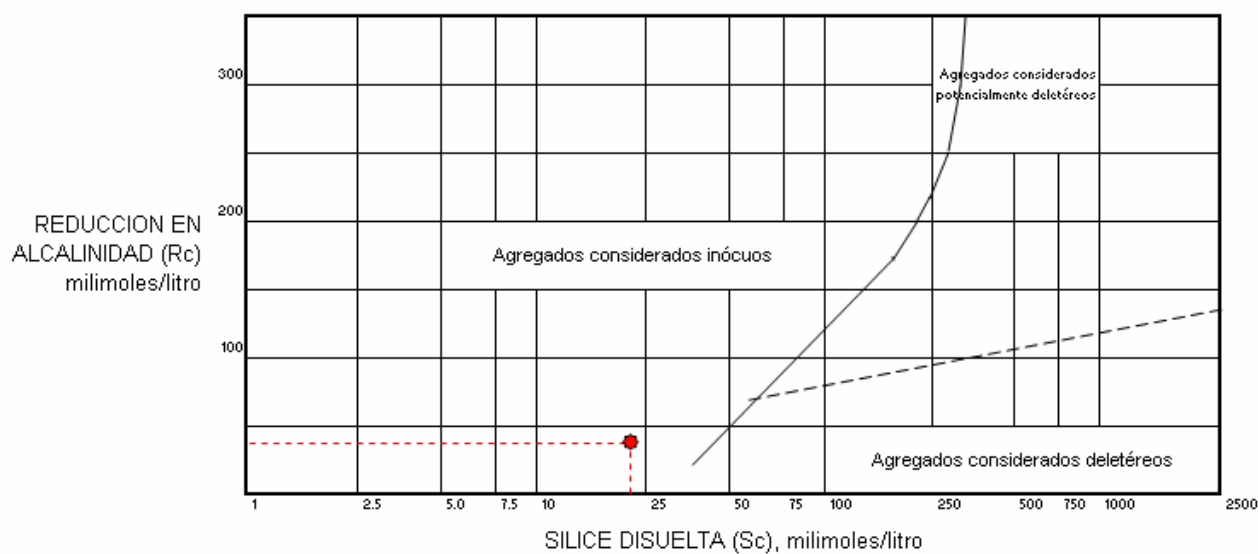


Figura 4.3
Prueba de reactividad potencial del agregado grueso con los álcalis del cemento

4.1.4 Características técnicas del aditivo utilizado

Tabla 4.6
Hoja Técnica del producto Sikament®-190 CR^[63]

Descripción:	Aditivo líquido multipropósito, reductor de agua de rango medio, plastificante y de corto retardo de fraguado para concreto. No contiene cloruros. Cumple con la norma ASTM C 494 ^[22] . Tipo A y ASTM C 1017 ^[23] Tipo II
Usos:	Sikament®-190 CR se utiliza principalmente en la elaboración de concretos para todo tipo de estructuras, especialmente diseñado para emplearse como reductor de agua, plastificante o fluidificante con sólo variar la dosificación
Ventajas:	<ul style="list-style-type: none"> - Aumenta las resistencias mecánicas - Permite acabados superficiales de alta calidad - Permite una mayor adherencia al acero de refuerzo - Reduce la permeabilidad - Se puede redosificar en obra para facilitar la colocación y/o bombeo del concreto sin afectar los tiempos de fraguado
Modo de Empleo Aplicación del Producto	<p>Como plastificante o superfluidificante Agregue Sikament®-190 CR al concreto ya mezclado, en este caso debe ampliarse el tiempo de mezclado medio minuto por cada metro cúbico de concreto</p> <p>Como reductor de agua Agregue Sikament®-190 CR junto con el agua de mezcla durante la preparación del concreto</p>
Dosificación:	<p>Como reductor de agua y plastificante (ASTM C 494 Tipo A) De 0,4% a 0,6% del peso del cemento (3,0 a 5,0 ml/kg de cemento)</p> <p>Como superfluidificante (ASTM C 1017 Tipo II) De 0,4% a 0,6% del peso del cemento (3,0 a 5,0 ml/kg de cemento)</p>



Figura 4.4
Aditivo Sikament®-190 CR, utilizado

4.2. Resultados de las pruebas del concreto fresco

4.2.1 Resultados de cohesión y trabajabilidad

Tabla 4.7
Propiedades físicas del concreto fresco^[52]

Número de Mezcla		Aspecto	Cohesión	Trabajabilidad	Acabado
Mezcla 1	a/c=0.45	Balanceado	Mucha	Buena	Fácil
	a/c=0.65				
Mezcla 2	a/c=0.45	Balanceado	Mucha	Buena	Fácil
	a/c=0.65				
Mezcla 3	a/c=0.45	Balanceado	Mucha	Buena	Fácil
	a/c=0.65				
Mezcla 4	a/c=0.45	Balanceado	Mucha	Buena	Fácil
	a/c=0.65				
Mezcla 5	a/c=0.45	Balanceado	Mucha	Buena	Fácil
	a/c=0.65				
Mezcla 6	a/c=0.45	Balanceado	Mucha	Buena	Fácil
	a/c=0.65				
Mezcla 7	a/c=0.45	Balanceado	Mucha	Buena	Fácil
	a/c=0.65				

4.2.2 Resultados de revenimiento.

Tabla 4.8
Resultados de revenimiento de las mezclas de concreto^[52]

Numero de mezcla	a/c = 0.45	a/c = 0.65
Mezcla 1	10 cm	10 cm
Mezcla 2	9 cm	10 cm
Mezcla 3	10 cm	9 cm
Mezcla 4	9 cm	9 cm
Mezcla 5	10 cm	9 cm
Mezcla 6	9 cm	9 cm
Mezcla 7	10 cm	10 cm
Promedio	9.57 cm	9.43 cm
Desviación estándar	0.49	0.49

4.2.3 Resultados del peso volumétrico.

Tabla 4.9
Resultados de peso volumétrico^[52]

Número de Mezcla	a/c = 0.45	a/c = 0.65
Mezcla 1	2339 kg/m ³	2317 kg/m ³
Mezcla 2	2333 kg/m ³	2305 kg/m ³
Mezcla 3	2323 kg/m ³	2316 kg/m ³
Mezcla 4	2326 kg/m ³	2312 kg/m ³
Mezcla 5	2327 kg/m ³	2315 kg/m ³
Mezcla 6	2323 kg/m ³	2315 kg/m ³
Mezcla 7	2335 kg/m ³	2332 kg/m ³
Promedio	2329.43 kg/m³	2316.00 kg/m³
Desviación estándar	5.80	7.52

4.2.4 Resultados de contenido de aire

Tabla 4.10
Resultados de contenido de aire de las mezclas^[52]

Número de mezcla	a/c = 0.45	a/c = 0.65
Mezcla 1	2.8 %	2.8 %
Mezcla 2	2.6 %	2.4 %
Mezcla 3	2.4 %	2.2 %
Mezcla 4	2.8 %	2.4 %
Mezcla 5	2.7 %	2.6 %
Mezcla 6	2.7 %	2.6 %
Mezcla 7	2.7 %	2.4 %
Promedio	2.67 %	2.49 %
Desviación estándar	0.13	0.18

4.3 Resultados de las pruebas del concreto endurecido

4.3.1 Resultados de la prueba de resistencia mecánica a compresión simple

Tabla 4.11
Resultados de resistencia a la compresión a 28 días^[52]

Numero de mezcla	a/c = 0.45	a/c = 0.65
Mezcla 1	525 kg/cm ²	316 kg/cm ²
Mezcla 4	537 kg/cm ²	336 kg/cm ²
Mezcla 5	525 kg/cm ²	326 kg/cm ²
Mezcla 6	532 kg/cm ²	315 kg/cm ²
Promedio	529.75 kg/cm²	323.25 kg/cm²

Tabla 4.12
Resultados de resistencia a la compresión a los 90 días^[52]

Numero de Mezcla	a/c = 0.45	a/c = 0.65
Mezcla 1	692 kg/cm ²	424 kg/cm ²

4.3.2 Resultados de la prueba de resistencia mecánica a la tensión indirecta

Tabla 4.13
Resultados de la tensión indirecta a los 28 y 90 días^[52]

Numero de mezcla		a/c = 0.45	a/c = 0.65
Mezcla 3	28 días	35.7 kg/cm ²	11.7 kg/cm ²
	90 días	40.0 kg/cm ²	31.0 kg/cm ²

4.3.3 Resultados de la prueba del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson del concreto a compresión

Tabla 4.14
Resultados del Módulo de Elasticidad a los 28 y 90 días^[52]

Numero de mezcla		a/c = 0.45	a/c = 0.65
Mezcla 2	28 días	208700 kg/cm ²	188300 kg/cm ²
	90 días	231200 kg/cm ²	219400 kg/cm ²

4.3.4. Resultados de la prueba de densidad, absorción y vacíos

4.3.4.1 Absorción después de inmersión

Tabla 4.15
Resultados de Absorción después de inmersión a los 28 días^[52]

Numero de Mezcla	a/c = 0.45	a/c = 0.65
Mezcla 4	5.9 %	7.3 %
Mezcla 5	6.2 %	7.6 %
Promedio	6.05 %	7.45 %

4.3.4.2 Absorción después de inmersión y ebullición; Absorción total

Tabla 4.16
Resultados de Absorción después de inmersión y ebullición a los 28 días^[52]

Numero de mezcla	a/c = 0.45	a/c = 0.65
Mezcla 4	6.2 %	7.4 %
Mezcla 5	6.4 %	7.7 %
Promedio	6.3 %	7.55 %

4.3.4.3 Porosidad total

Tabla 4.17
Resultados de Porosidad total a los 28 días^[52]

Numero de Mezcla	a/c = 0.45	a/c = 0.65
Mezcla 4	13.8 %	16.2 %
Mezcla 5	14.1 %	16.7 %
Promedio	13.95 %	16.45 %

4.3.5. Resultados de la prueba de absorción capilar (anexo a)

Método de ensayo de Fagerlund^[43]

Tabla 4.18
Resultados de las tres pruebas de absorción capilar para un concreto con una relación a/c = 0.45

	Coefficiente de resistencia a la penetración del agua (m) s/m ²	Coefficiente de absorción capilar (k) kg/m ² s ^{1/2}	Coefficiente de la porosidad efectiva (εe) %	Absorción capilar (S) m/s ^{1/2}
Ensayo-1	3.50E+07	0.0147	8.723	1.69E-04
Ensayo-2	3.62E+07	0.0141	8.485	1.66E-04
Ensayo-3	3.32E+07	0.0152	8.758	1.73E-04
PROMEDIO	3.48E+07	0.0147	8.655	1.70E-04

Tabla 4.19
Resultados de las dos pruebas de absorción capilar para un concreto con una relación a/c = 0.65

	Coefficiente de resistencia a la penetración del agua (m) s/m ²	Coefficiente de absorción capilar (k) kg/m ² s ^{1/2}	Coefficiente de la porosidad efectiva (εe) %	Absorción capilar (S) m/s ^{1/2}
Ensayo-4	3.80E+07	0.0179	11.061	1.62E-04
Ensayo-5	3.41E+07	0.0199	11.594	1.71E-04
PROMEDIO	3.60E+07	0.0189	11.328	1.67E-04

4.4 Resumen de resultados de las pruebas realizadas al concreto

4.4.1 Resultados de las pruebas del concreto fresco

Tabla 4.20
Resumen de resultados de las propiedades del concreto fresco utilizado

	Relación a/c = 0.45	Relación a/c = 0.65
Revenimiento	9.57 cm	9.43 cm
	Desv. estándar = 0.49	Desv. estándar = 0.49
	Relación a/c = 0.45	Relación a/c = 0.65
Peso volumétrico	2329.43 kg/m ³	2316.00 kg/m ³
	Desv. estándar = 5.80	Desv. estándar = 7.5
	Relación a/c = 0.45	Relación a/c = 0.65
Contenido de aire	2.67 %	2.49 %
	Desv. estándar = 0.13	Desv. estándar = 0.18
	Relación a/c = 0.45	Relación a/c = 0.65
Cohesión	Mucha	Mucha
Trabajabilidad	Buena	Buena

4.4.2 Resultados de las pruebas del concreto endurecido

Tabla 4.21
Resumen de resultados de las propiedades del concreto endurecido utilizado

Resistencia mecánica	Relación a/c = 0.45		Relación a/c = 0.65	
	Resistencia a la compresión	28 días	51.95 MPa	28 días
90 días		67.86 MPa	90 días	41.58 MPa
Resistencia a la tensión indirecta	28 días	3.50 MPa	28 días	1.15 MPa
	90 días	3.92 MPa	90 días	3.04 MPa

Deformabilidad	Relación a/c = 0.45		Relación a/c = 0.65	
	Módulo de elasticidad	28 días	20.47 GPa	28 días
90 días		22.67 GPa	90 días	21.52 GPa

Impermeabilidad	Relación a/c = 0.45		Relación a/c = 0.65	
	Absorción total (a los 28 días)	6.30 %	7.55 %	
	Porosidad total (a los 28 días)	13.95 %	16.45 %	

Método de Fagerlund	Relación a/c = 0.45		Relación a/c = 0.65	
	Coeficiente de resistencia a la penetración del agua, m	3.48E+07 seg/m^2	3.60E+07 seg/m^2	
	Coeficiente de absorción capilar, k	0.0147 $\text{k}/\text{m}^2\text{seg}^{1/2}$	0.0189 $\text{k}/\text{m}^2\text{seg}^{1/2}$	
	Coeficiente de la porosidad efectiva, ϵ_e	8.655 %	11.328 %	
	Absorción capilar, S	1.70E-04 $\text{m}/\text{seg}^{1/2}$	1.67E-04 $\text{m}/\text{seg}^{1/2}$	

4.5 Resumen de resultados de las pruebas de campo.

4.5.1 Resultados de los parámetros ambientales (anexo b)

Nombre de la estación: Morelia

Código: Mx5

País: México

Atmósfera aparente: Urbano

Tabla 4.22
Parámetros ambientales de la estación de Morelia (Mx5)

PARAMETROS	PERIODOS		Primer Año	Segundo Año
			Octubre 2003 a Septiembre 2004	Octubre 2004 a Septiembre 2005
*Temperatura promedio (°C)	AvgTemp	Promedio	17.87	-
*Humedad relativa (%)	AvgRh	Promedio	71.47	-
*Tiempo de humectación	TDH	Fracción de TDH	0.43	-
*Precipitación pluvial (mm)	Rain	Suma	1203.81	-
*Velocidad del viento (m/s)	WSK	Promedio	1.61	-
*Dirección del viento Azimut (°)	Dir	Promedio	152.88	-
*Sensor de radiación solar (W/m ²)	AvgSR	Promedio	194.35	-
Compuestos de azufre (mg/m ² día)	SO ₂		-	-
Cloruros (mg/m ² día)	Cl ⁻		-	-
Dióxido de carbono (mg/l)	CO ₂		-	-
Insolación (h/año)			-	-

- Los datos utilizados son de la Estación Meteorológica Automática del Servicio Meteorológico Nacional, número 54 con latitud 19°22'51"longitud 102°01'44" y altitud 1606 msnm.

Nombre de la estación: Veracruz
Código: Mx6
País: México
Atmósfera aparente: Urbano - Marina

Tabla 4.23
Parámetros ambientales de la estación de Veracruz (Mx6).

PARAMETROS		PERIODOS		Primer Año	Segundo Año
				Junio 2003 a Mayo 2004	Junio 2004 a Mayo 2005
*Temperatura promedio (°C)	AvgTemp	Promedio		25.31	25.56
*Humedad relativa (%)	AvgRh	Promedio		87.17	86.82
*Tiempo de humectación	TDH	Fracción de TDH		0.73	0.76
*Precipitación pluvial (mm)	Rain	Suma		1516.23	1122.18
*Velocidad del viento (m/s)	WSK	Promedio		5.52	-
*Dirección del viento Azimut (°)	Dir	Promedio		177.97	171.85
*Sensor de radiación solar (W/m ²)	AvgSR	Promedio		219.23	175.14
Compuestos de azufre (mg/m ² día)	SO ₂				
Cloruros (mg/m ² día)	Cl ⁻				
Dióxido de carbono (mg/l)	CO ₂				
Insolación (h/año)		Promedio		209.90	

* Los datos utilizados son de la Estación Meteorológica Automática del Servicio Meteorológico Nacional, número 86 con latitud 19°08'34"longitud 96°06'41" y altitud 19 msnm.

Nombre de la estación: México D.F.
Código: Mx7
País: México
Atmósfera aparente: Urbano Industrial

Tabla 4.24
Parámetros ambientales de la estación de México, D.F. (Mx7)

PARAMETROS	PERIODOS		Primer Año	Segundo Año
			Abril 2003 a Marzo 2004	Abril 2004 a Marzo 2005
*Temperatura promedio (°C)	AvgTemp	Promedio	16.81	16.87
*Humedad relativa (%)	AvgRh	Promedio	56.31	56.63
*Tiempo de humectación	TDH	Fracción de TDH	0.20	0.21
*Precipitación pluvial (mm)	Rain	Suma	1107.22	924.10
*Velocidad del viento (m/s)	WSK	Promedio	2.46	2.45
*Dirección del viento (°)	Dir	Promedio	181.88	220.13
*Sensor de radiación solar (W/m ²)	AvgSR	Promedio	199.90	202.48
Compuestos de azufre (mg/m ² día)	SO ₂		-	-
Cloruros (mg/m ² día)	Cl ⁻		-	-
Dióxido de carbono (mg/l)	CO ₂		-	-
Insolación (h/año)		Promedio	-	-

• Los datos utilizados son de la Estación Meteorológica Automática del Servicio Meteorológico Nacional, número 30 con latitud 99°11'49", longitud 19°24'13" y altitud 2320 msnm.

Nombre de la estación: Querétaro
Código: Mx8
País: México
Atmósfera aparente: Urbano

Tabla 4.25
Parámetros ambientales de la estación de Querétaro (Mx8)

PARAMETROS		PERIODOS		Primer Año	Segundo Año
				Mayo 2003 a Abril 2004	Mayo 2004 a Abril 2005
*Temperatura promedio (°C)	AvgTemp	Promedio		15.27	15.43
*Humedad relativa (%)	AvgRh	Promedio		63.81	64.19
*Tiempo de humectación	TDH	Fracción de TDH		0.30	0.34
*Precipitación pluvial (mm)	Rain	Suma		836.19	731.38
*Velocidad del viento (m/s)	WSK	Promedio		2.45	2.18
*Dirección del viento (°)	Dir	Promedio		147.54	157.74
*Sensor de radiación solar (W/m ²)	AvgSR	Promedio		240.74	242.11
Compuestos de azufre (mg/m ² día)	SO ₂				
Cloruros (mg/m ² día)	Cl ⁻				
Dióxido de carbono (mg/l)	CO ₂				
Insolación (h/año)		Promedio			

* Los datos utilizados son de la Estación Meteorológica Automática del Servicio Meteorológico Nacional, número 66 con latitud 20°23'25", longitud 100°17'1" y altitud 2280 msnm.

Nombre de la estación: Toluca
Código: Mx9
País: México
Atmósfera aparente: Urbano Industrial

Tabla 4.26
Parámetros ambientales de la estación de Toluca (Mx9)

PARAMETROS	PERIODOS		Primer Año	Segundo Año
			Mayo 2003 a Abril 2004	Mayo 2004 a Abril 2005
*Temperatura promedio (°C)	AvgTemp	Promedio	6.43	6.50
*Humedad relativa (%)	AvgRh	Promedio	76.87	77.86
*Tiempo de humectación	TDH	Fracción de TDH	0.52	0.56
*Precipitación pluvial (mm)	Rain	Suma	1605.84	1665.01
*Velocidad del viento (m/s)	WSK	Promedio	3.57	2.18
*Dirección del viento Azimut (°)	Dir	Promedio	152.71	157.09
*Sensor de radiación solar (W/m ²)	AvgSR	Promedio	213.21	205.57
Compuestos de azufre (mg/m ² día)	SO ₂		-	-
Cloruros (mg/m ² día)	Cl ⁻		-	-
Dióxido de carbono (mg/l)	CO ₂		-	-
Insolación (h/año)		Promedio	-	-

* Los datos utilizados son de la Estación Meteorológica Automática del Servicio Meteorológico Nacional, número 49 con latitud 19°32'31", longitud 99°31'9" y altitud 3754 msnm.

Nombre de la estación: Mexicali
Código: Mx10
País: México
Atmósfera aparente: Urbano

Tabla 4.27
Parámetros ambientales de la estación de Mexicali (Mx10)

PARAMETROS		PERIODOS		Primer Año	Segundo Año
				Marzo 2003 a Febrero 2004	Marzo 2004 a Febrero 2005
*Temperatura promedio (°C)	AvgTemp	Promedio		24.12	23.38
*Humedad relativa (%)	AvgRh	Promedio		39.07	44.18
*Tiempo de humectación	TDH	Fracción de TDH		0.02	0.08
*Precipitación pluvial (mm)	Rain	Suma		49.18	93.35
*Velocidad del viento (m/s)	WSK	Promedio		3.03	2.99
*Dirección del viento (°)	Dir	Promedio		200.86	203.36
*Sensor de radiación solar (W/m ²)	AvgSR	Promedio		229.50	230.96
Compuestos de azufre (mg/m ² día)	SO ₂			-	-
Cloruros (mg/m ² día)	Cl ⁻			-	-
Dióxido de carbono (mg/l)	CO ₂			-	-
Insolación (h/año)		Promedio		-	-

* Los datos utilizados son de la Estación Meteorológica Automática del Servicio Meteorológico Nacional, número 5 con latitud 32°40'1", longitud 115°17'27" y altitud 50 msnm.

4.5.2 Resultados electroquímicos

Criterios utilizados para determinar si el acero de refuerzo se encuentra pasivo o activo, en cada estación de campo.

- Velocidad de corrosión

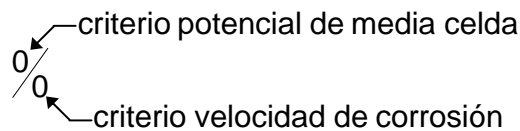
$$\text{Velocidad de corrosión} > 0.1 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$$

- Potencial de media celda

$$\text{Potencial} < -0.350 \text{ V vs csc}$$

En cada estación de campo se colocaron tres varillas con las mismas características, de esas tres varillas, en cada medición se verifico cuantas de ellas cumplían el criterio para identificar si el acero se encontraba activo o pasivo.

El criterio empleado para realizar este análisis es el siguiente:



En el resumen de resultados electroquímicos que se presenta, indican cuántas varillas cumplen con uno, otro o ambos criterios y poder afirmar que se está corroyendo, en el Anexo C, se presentan gráficamente todos los resultados de estas mediciones.

Nombre de la estación: Morelia
Código: Mx5
País: México
Atmósfera aparente: Urbano

Tabla 4.28
Resultados de las varillas de acero activadas de la cara 1 de la estación
Morelia (Mx5)

Fecha	Relación a/c = 0.65			Relación a/c =0.45		
	1.50	2.00	3.00	1.50	2.00	3.00
22/10/2003	0/1	0/1	0/1	0/0	0/0	0/1
28/01/2004	0/0	0/2	0/0	0/0	0/0	0/0
24/02/2004	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
27/05/2004	0/0	0/1	0/0	0/0	0/1	0/0
28/06/2004	0/1	0/2	1/2	1/2	1/2	1/2
29/07/2004	0/0	0/2	0/2	0/0	0/1	0/0
26/11/2004	0/0	0/2	0/1	0/0	1/0	0/0
20/12/2004	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
01/02/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
08/03/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
03/05/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
25/05/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
22/06/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0

Tabla 4.29
Resultados de las varillas de acero activadas de la cara 2 de la estación
Morelia (Mx5)

Fecha	Relación a/c = 0.65			Relación a/c = 0.45		
	1.50	2.00	3.00	1.50	2.00	3.00
22/10/2003	0/0	0/0	0/0	0/2	0/0	0/0
28/01/2004	0/0	0/0	0/0	0/2	0/0	0/0
24/02/2004	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
27/05/2004	0/0	0/0	1/0	0/0	0/0	0/0
28/06/2004	1/1	1/2	1/3	0/2	1/2	1/2
29/07/2004	0/0	0/0	0/0	0/2	0/0	0/0
26/11/2004	0/0	0/0	0/0	0/2	0/1	0/0
20/12/2004	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
01/02/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
08/03/2005	0/0	0/0	0/0	0/1	0/0	0/0
03/05/2005	0/0	0/0	0/0	0/1	0/0	0/0
25/05/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
22/06/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0

Nombre de la estación: Veracruz
Código: Mx6
País: México
Atmósfera aparente: Urbano marina

Tabla 4.30
Resultados de las varillas de acero activadas de la cara 1 de la estación
Veracruz (Mx6)

Fecha	Relación a/c = 0.65			Relación a/c = 0.45		
	1.50	2.00	3.00	1.50	2.00	3.00
26/06/2003	0/1	0/1	0/2	0/2	0/1	0/1
31/07/2003	0/3	0/3	0/3	0/2	0/2	0/2
16/10/2003	0/2	0/2	0/2	0/2	0/1	0/1
01/12/2004	0/2	0/1	0/0	0/0	0/0	0/0
17/02/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
16/05/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0

Tabla 4.31
Resultados de las varillas de acero activadas de la cara 2 de la estación Veracruz (Mx6)

Fecha	Relación a/c = 0.65			Relación a/c = 0.45		
	1.50	2.00	3.00	1.50	2.00	3.00
26/06/2003	0/3	0/2	0/1	0/1	0/0	0/1
31/07/2003	0/3	0/2	0/3	0/2	0/1	0/1
16/10/2003	0/3	0/2	0/3	0/1	0/0	0/1
01/12/2004	0/1	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
17/02/2005	0/1	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
16/05/2005	0/1	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0

Nombre de la estación: México, D.F.
Código: Mx7
País: México
Atmósfera aparente: Urbano industrial

Tabla 4.32
Resultados de las varillas de acero activadas de la cara 1 de la estación México, D.F. (Mx7)

Fecha	Relación a/c = 0.65			Relación a/c = 0.45		
	1.50	2.00	3.00	1.50	2.00	3.00
20/06/2003	0/3	0/0	0/3	0/3	0/3	0/3
17/07/2003	0/1	0/1	0/0	0/1	0/1	0/0
27/08/2003	0/0	0/0	0/1	0/0	0/0	0/0
23/10/2003	0/2	0/0	0/0	0/0	0/0	0/1
05/12/2003	0/0	0/2	0/1	0/0	0/0	0/0
26/01/2004	0/0	0/1	0/0	0/0	0/0	0/0
27/02/2004	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
30/06/2004	0/1	0/1	0/0	0/0	0/0	0/0
13/12/2004	0/0	0/0	0/0	0/0	1/0	0/0
28/01/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
07/03/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
22/04/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
27/05/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
20/06/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0

Tabla 4.33
Resultados de las varillas de acero activadas de la cara 2 de la estación
México, D.F. (Mx7)

Fecha	Relación a/c = 0.65			Relación a/c = 0.45		
	1.50	2.00	3.00	1.50	2.00	3.00
20/06/2003	0/1	0/3	0/3	0/1	0/2	0/1
17/07/2003	0/0	0/1	0/1	0/0	0/0	0/0
27/08/2003	0/0	0/0	0/1	0/0	0/1	0/0
23/10/2003	0/0	0/0	0/1	0/0	0/0	0/0
05/12/2003	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
26/01/2004	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
27/02/2004	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
30/06/2004	0/0	0/1	0/1	0/0	0/0	0/0
13/12/2004	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
28/01/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
07/03/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
22/04/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
27/05/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
20/06/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0

Nombre de la estación: Querétaro
Código: Mx8
País: México
Atmósfera aparente: Urbano

Tabla 4.34
Resultados de las varillas de acero activadas de la cara 1 de la estación
Querétaro (Mx8)

Fecha	Relación a/c = 0.65			Relación a/c = 0.45		
	1.50	2.00	3.00	1.50	2.00	3.00
18/07/2003	0/2	0/1	0/1	0/2	0/0	0/0
03/09/2003	0/1	0/1	0/0	0/0	0/0	0/0
20/10/2003	0/1	0/1	0/0	0/3	0/0	0/0
17/12/2003	0/1	0/1	0/2	0/0	0/0	0/0
05/03/2004	0/1	0/0	0/1	0/2	0/0	0/0
21/05/2004	0/2	0/1	0/1	0/2	0/0	0/0
08/12/2004	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
24/02/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
06/04/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
01/06/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
13/07/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0

Tabla 4.35
Resultados de las varillas de acero activadas de la cara 2 de la estación Querétaro (Mx8)

Fecha	Relación a/c = 0.65			Relación a/c = 0.45		
	1.50	2.00	3.00	1.50	2.00	3.00
18/07/2003	0/0	0/1	0/0	0/0	0/1	0/1
03/09/2003	0/1	0/1	0/0	0/0	0/0	0/1
20/10/2003	0/1	0/1	0/0	0/1	0/1	0/2
17/12/2003	0/1	0/1	0/0	0/1	0/0	0/1
05/03/2004	0/1	0/1	0/1	0/1	0/0	0/1
21/05/2004	0/2	0/1	0/0	0/0	0/0	0/1
08/12/2004	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
24/02/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
06/04/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
01/06/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
13/07/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0

Nombre de la estación: Toluca
Código: Mx9
País: México
Atmósfera aparente: Urbano industrial

Tabla 4.36
Resultados de las varillas de acero activadas de la cara 1 de la estación Toluca (Mx9)

Fecha	Relación a/c = 0.65			Relación a/c = 0.45		
	1.50	2.00	3.00	1.50	2.00	3.00
16/06/2003	0/3	0/3	0/2	0/3	0/3	0/2
16/07/2003	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
28/08/2003	0/2	0/1	0/1	0/1	0/0	0/2
23/10/2003	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
04/12/2003	0/0	0/1	0/0	0/1	0/1	0/1
27/01/2004	0/0	0/0	0/0	0/0	0/1	0/0
26/02/2004	0/0	0/0	0/0	0/0	0/1	0/0
29/06/2004	1/1	1/2	1/1	0/2	1/1	2/3
14/12/2004	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
27/01/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
08/03/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
26/05/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0

21/06/2005	0/0	0/1	0/0	0/0	0/0	0/0
------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla 4.37

Resultados de las varillas de acero activadas de la cara 2 de la estación Toluca (Mx9)

Fecha	Relación a/c = 0.65			Relación a/c = 0.45		
	1.50	2.00	3.00	1.50	2.00	3.00
16/06/2003	0/3	0/3	0/3	0/3	0/3	0/2
16/07/2003	0/0	0/1	0/0	0/0	0/0	0/1
28/08/2003	0/0	0/1	0/1	0/2	0/0	0/2
23/10/2003	0/0	0/2	0/0	0/0	0/0	0/0
04/12/2003	0/0	0/2	0/0	0/1	0/0	0/1
27/01/2004	0/0	0/0	0/0	0/1	0/0	0/0
26/02/2004	0/0	0/1	0/0	0/0	0/0	0/0
29/06/2004	0/0	1/2	1/1	2/1	1/2	1/2
14/12/2004	0/0	0/1	0/0	0/0	0/0	0/0
27/01/2005	0/0	0/1	0/0	0/0	0/0	0/0
08/03/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
26/05/2005	0/0	0/1	0/0	0/0	0/0	0/0
21/06/2005	0/0	0/2	0/0	0/0	0/1	0/0

Nombre de la estación: Mexicali
Código: Mx10
País: México
Atmósfera aparente: Urbano

Tabla 4.38

Resultados de las varillas de acero activadas de la cara 1 de la estación Mexicali (Mx10)

Fecha	Relación a/c = 0.65			Relación a/c = 0.45		
	1.50	2.00	3.00	1.50	2.00	3.00
16/06/2003	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
18/03/2004	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
10/02/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
26/07/2005	0/1	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0

Tabla 4.39
Resultados de las varillas de acero activadas de la cara 2 de la estación
(Mexicali Mx10)

Fecha	Relación a/c = 0.65			Relación a/c = 0.45		
	1.50	2.00	3.00	1.50	2.00	3.00
16/06/2003	0/0	0/0	0/1	0/0	0/0	0/0
18/03/2004	0/1	0/1	0/0	0/1	0/0	0/0
10/02/2005	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
26/07/2005	0/1	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0

4.5.3 Resultados de carbonatación

Nombre de la estación: Morelia
Código: Mx5
País: México
Atmósfera aparente: Urbano

Tabla 4.40
Resultados de carbonatación del primer año en la estación de Morelia (Mx5)

Relación a/c	e_{CO_2} mm		K (mm/a ^{1/2})	
	Cara exp.	Cara resg.	Cara exp.	Cara resg.
0.45	1.00	1.66	1.00	1.66
0.65	5.33	5.33	5.33	5.33

Tabla 4.41
Resultados de carbonatación del segundo año en la estación de Morelia (Mx5)

Relación a/c	e_{CO_2} mm		K (mm/a ^{1/2})	
	Cara exp.	Cara resg.	Cara exp.	Cara resg.
0.45	-	-	-	-
0.65	-	-	-	-

Nombre de la estación: Veracruz
Código: Mx6
País: México
Atmósfera aparente: Urbano Marina

Tabla 4.42
Resultados de carbonatación del primer año en la estación de Veracruz (Mx6)

Relación a/c	e_{CO_2} mm		K (mm/a ^{1/2})	
	Cara exp.	Cara resg.	Cara exp.	Cara resg.
0.45	0.91	0.79	0.76	0.66
0.65	4.43	4.28	3.70	3.57

Tabla 4.43
Resultados de carbonatación del segundo año en la estación de Veracruz (Mx6)

Relación a/c	e_{CO_2} mm		K (mm/a ^{1/2})	
	Cara exp.	Cara resg.	Cara exp.	Cara resg.
0.45	1.54	1.26	1.03	0.84
0.65	5.72	4.93	3.85	3.31

Nombre de la estación: México, D.F.
Código: Mx7
País: México
Atmósfera aparente: Urbano Industrial

Tabla 4.44
Resultados de carbonatación del primer año en la estación de México, D.F.
(Mx7)

Relación a/c	e_{CO_2} mm		K (mm/a ^{1/2})	
	Cara exp.	Cara resg.	Cara exp.	Cara resg.
0.45	1.60	1.75	1.23	1.34
0.65	5.44	4.96	4.17	3.80

Tabla 4.45
Resultados de carbonatación del segundo año en la estación de México, D.F.
(Mx7)

Relación a/c	e_{CO_2} mm		K (mm/a ^{1/2})	
	Cara exp.	Cara resg.	Cara exp.	Cara resg.
0.45	3.50	1.95	2.34	1.30
0.65	8.34	7.63	5.56	5.09

Nombre de la estación: Querétaro
Código: Mx8
País: México
Atmósfera aparente: Urbano

Tabla 4.46
Resultados de carbonatación del primer año en la estación de Querétaro (Mx8)

Relación a/c	e_{CO_2} mm		K (mm/a ^{1/2})	
	Cara exp.	Cara resg.	Cara exp.	Cara resg.
0.45	0.83	0.72	0.66	0.57
0.65	6.88	6.11	5.43	4.82

Tabla 4.47
Resultados de carbonatación del segundo año en la estación de Querétaro (Mx8)

Relación a/c	e_{CO_2} mm		K (mm/a ^{1/2})	
	Cara exp.	Cara resg.	Cara exp.	Cara resg.
0.45	2.72	1.75	1.88	1.21
0.65	7.10	6.60	4.92	4.57

Nombre de la estación: Toluca
Código: Mx9
País: México
Atmósfera aparente: Urbano Industrial

Tabla 4.48
Resultados de carbonatación del primer año en la estación de Toluca (Mx9)

Relación a/c	e_{CO_2} mm		K (mm/a ^{1/2})	
	Cara exp.	Cara resg.	Cara exp.	Cara resg.
0.45	2.44	2.08	1.91	1.63
0.65	5.80	5.47	4.55	4.29

Tabla 4.49
Resultados de carbonatación del segundo año en la estación de Toluca (Mx9)

Relación a/c	e_{CO_2} mm		K (mm/a ^{1/2})	
	Cara exp.	Cara resg.	Cara exp.	Cara resg.
0.45	3.54	2.23	2.42	1.53
0.65	8.63	8.37	5.89	5.72

Nombre de la estación: Mexicali
Código: Mx10
País: México
Atmósfera aparente: Urbano

Tabla 4.50
Resultados de carbonatación del primer año en la estación de Mexicali (Mx10)

Relación a/c	e_{CO_2} mm		K (mm/a ^{1/2})	
	Cara exp.	Cara resg.	Cara exp.	Cara resg.
0.45	5.85	4.81	4.19	3.45
0.65	9.74	9.99	6.97	7.15

Tabla 4.51
Resultados de carbonatación del segundo año en la estación de Mexicali (Mx10)

Relación a/c	e_{CO_2} mm		K (mm/a ^{1/2})	
	Cara exp.	Cara resg.	Cara exp.	Cara resg.
0.45	6.72	5.41	4.33	3.49
0.65	10.99	10.03	7.09	6.47

5 Discusión de resultados

5.1 Análisis de resultados de las mezclas de concreto.

Las mezclas que se diseñaron fueron con base en relación agua/cemento, debido a la influencia que ésta ejerce en la resistencia mecánica, la impermeabilidad a los fluidos y otras propiedades del concreto endurecido, dicha relación se utilizó como dato de partida de diseño debido a que éste es el parámetro común en las estaciones los países involucrados en el proyecto, estas relaciones como se menciono al principio de este documento son de 0.45 y 0.65. De acuerdo con los resultados de las pruebas del concreto fresco y endurecido, se analizaran si estos resultados corresponden a los registrados en otros documentos.

Como lo muestra la figura 5.1,^[77] para la relación $a/c = 0.45$ se espera una resistencia a la compresión $f'c = 380 \text{ kg/cm}^2$ (37.26 MPa), y para la relación $a/c = 0.65$ de $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ (23.53 MPa).

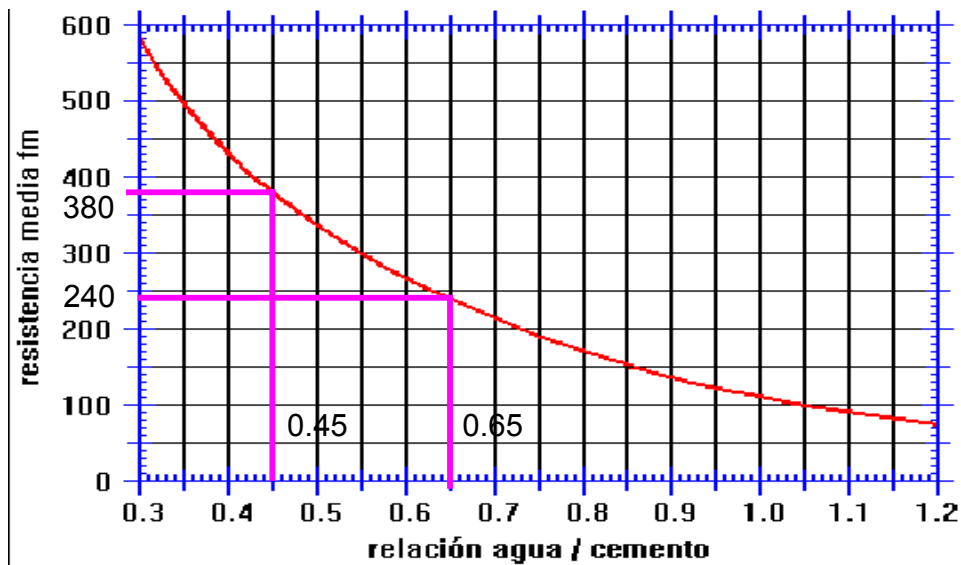


Figura 5.1

Relación a/c de la mezcla medidas al peso para una resistencia media de 390 kg/cm^2 , medida a los 28 días ^[77]

Tabla 5.1
Valores esperados de f'_c en función de la relación agua/cemento

Relación agua/cemento	Resistencia a la compresión f'_c	
	kg/m ²	MPa
0.45	380	37.26
0.65	240	23.53

5.2 Análisis de acuerdo con la cantidad de cemento utilizado

Una vez conocido el papel general de los componentes del cemento, es posible realizar ajustes convenientes en su composición, y así poder modificar sus propiedades del cemento Pórtland. La ASTM clasifica los cementos Pórtland en cinco tipos distintos, diferenciando únicamente las cantidades relativas de los componentes del cemento.

Por la composición química típica de cemento utilizado y de acuerdo con la asignación de las propiedades del cemento Pórtland ASTM, el que se utilizó para la fabricación de las mezclas es el CPO 30 RS, de acuerdo con la clasificación de la ASTM el tipo de cemento empleado es del Tipo I, la elección se debió a que es el más común en la construcción en general, donde no requieren propiedades especiales o específicas.

Por medio de la cantidad de cemento utilizado ver tabla 5.2. Y el contenido de aire se puede estimar con base en la figura 5.2 ^[68] el f'_c que se espera a los 28 días.

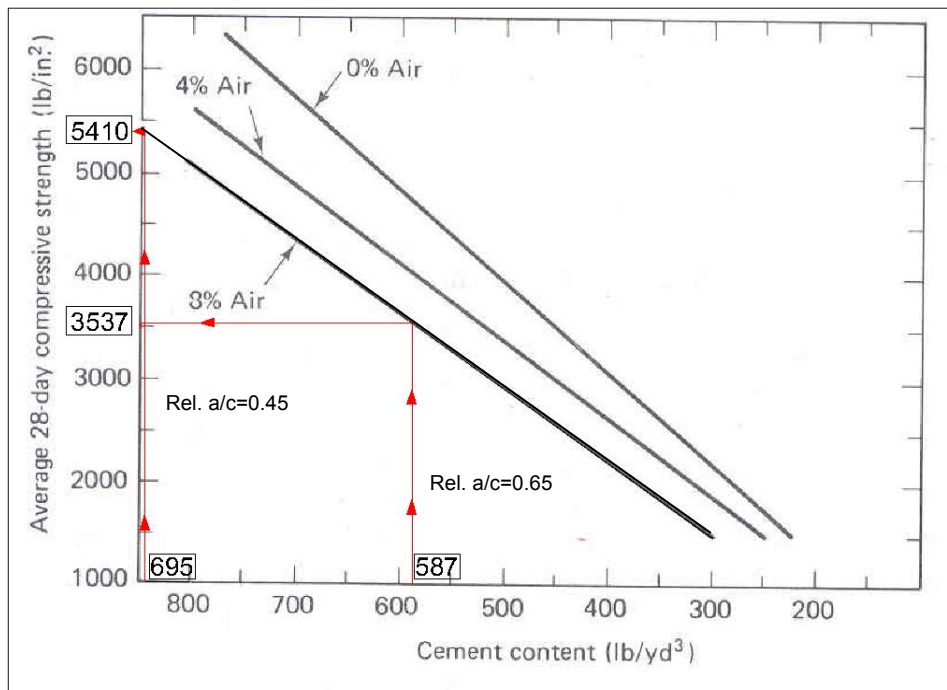


Figura 5.2

Resistencia a la compresión en relación a la cantidad de cemento con y sin contenido de aire, con un revenimiento constante^[78]

Se empleó la línea de contenido de aire del 3%, de acuerdo con los resultados que se muestran en la tabla 4.10.

Tabla 5.2.

Valores esperados de f'_c con relación a la cantidad de cemento y al contenido de aire, usando la figura 5.2.

Relación agua/cemento	Contenido de aire 3%			
	Contenido de cemento		Resistencia a la compresión f'_c	
	lb/yd ³	kg/m ³	lb/in ²	MPa
0.45	587	411	5410	37.30
0.65	695	285	3537	24.38

5.3 Análisis de la reactividad potencial de los agregados

Al realizar la prueba de reactividad potencial de los agregados con los álcalis del cemento por el método químico, según la Norma NMX C 271 y como lo indica la figura X1.1 de la Norma ASTM C 289,^[60] en función de los resultados que se obtuvieron como se muestran en las figuras 4.2 y 4.3, el resultado es negativo y se identifican como inocuos porque el riesgo de reacción es nulo, ya que no son silíceos o carbonatos, y en consecuencia, pueden emplearse sin restricciones por este concepto.

El agregado grueso tiene gran influencia en la deformabilidad bajo esfuerzos, así que es importante recalcar que el agregado que se utilizó fue basáltico.

5.4 Análisis del revenimiento, cohesión y trabajabilidad con relación al aditivo

Con los datos generados de revenimiento se puede afirmar que de acuerdo con la recomendación que hace la norma ACI 211,^[73] tabla 5.3, la consistencia del concreto elaborado se puede definir como una mezcla fluida, manejable que puede colocarse sin pérdida de homogeneidad y que corresponde a una mezcla para un tipo de construcción de vigas, muros y columnas de edificios reforzados, que son las estructuras para las cuales se está haciendo la evaluación.

Debido a las dimensiones de los especímenes a construir, así como el armado del acero de refuerzo, se puede decir que era una estructura difícil en las condiciones de colocación del concreto, fue necesario recurrir a una mezcla de consistencia fluida;^[74] por ello se requirió diseñar una mezcla con aditivo químico fluidificante y reductor de agua de alto rango, Sikament[®]-190 CR, cuya finalidad fue incrementar sustancialmente el revenimiento,^[75] dándonos resultados de revenimiento de 9.5 cm, aproximadamente, para ambas mezclas.

Tabla 5.3
Revenimientos recomendables en las mezclas de concreto para diversos tipos de construcción ^[73]

Tipo de construcción	Revenimiento recomendado, cm	
	Máximo	Mínimo
Muros y zapatas de cimentación, reforzados	7.5	2.5
Muros, cajones y zapatas de subestructura, sin refuerzo	7.5	2.5
Vigas, muros y columnas de edificios, reforzados	10.0	2.5
Losas y pavimentos	7.5	2.5
Concreto masivo	5.0	2.5

5.5 Análisis de la resistencia a la compresión

Los resultados que se obtuvieron con relación a f'_c , ver tabla 4.11, tanto para la relación a/c de 0.45 y 0.65 resultan un poco altos, de acuerdo con la tabla 5.4. Adaptada por el ACI 211.1-1991,^[73] las resistencias aproximadas para diferentes relaciones a/c, usando agregados promedio, con y sin un aditivo inclusor de aire.

Tabla 5.4
Correspondencia entre la relación a/c y f'_c del concreto ^[67]

Resistencia a la compresión a los 28 días, kg/cm ²	Relación agua/cemento	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	=
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Para definir la correspondencia entre la relación a/c y la resistencia a la compresión, se realizó una interpolación para obtener el valor correspondiente para mezclas con relación a/c 0.45 y 0.65, se emplearon los valores de la columna de concreto sin aire incluido, ya que el aditivo utilizado fue para reducir agua y no para incluir aire.

Al Realizar la interpolación se obtienen los valores mostrados en la tabla 5.5.

Tabla 5.5
Correspondencia entre la relación a/c y $f'c$, ^[67] para valores de 0.45 y 0.65

Resistencia a la compresión a los 28 días		Relación agua/cemento	
		Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
kg/cm ²	MPa		
420	41.19	0.41	=
380	37.26	0.45	
350	34.32	0.48	0.40
280	27.46	0.57	0.48
229	22.46	0.65	
210	20.59	0.68	0.59
140	13.73	0.82	0.74

Los valores interpolados son menores que los obtenidos en las pruebas realizadas al concreto a los 28 días, así que será conveniente ocupar tales valores con cierta reserva y analizar el comportamiento que este tiene con los valores de otras pruebas realizadas al concreto endurecido.

Tabla 5.6
Comparación de los valores obtenidos en las pruebas con los valores que indica el ACI 211.1 ^[73]

Relación agua/cemento	Resistencia a la compresión a los 28 días, kg/cm ²				Evaluación
	ACI 211.1 ^[73]		Valores obtenidos en las pruebas de laboratorio		
	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	
0.45	380	37.26	529.75	51.95	30% más aprox
0.65	229	22.46	323.25	31.70	30% más aprox

5.6 Análisis de la resistencia mecánica a la tensión indirecta.

Los resultados de resistencia a la tensión indirecta de la tabla 4.13 respecto a las pruebas realizadas a los 28 días, están por debajo de los que corresponden a su resistencia a la compresión a los 28 días.

El valor de la resistencia a la tensión indirecta del concreto es aproximadamente de 8 al 12% de su resistencia a la compresión o se estima con la siguiente fórmula: ^[68]

$$\sigma_t = 0.3 (f'c)^{2/3} \text{ MPa}$$

σ_t = Resistencia mecánica a la tensión indirecta

Cálculo para obtener σ_t para la relación a/c = 0.45 a los 28 días

$$\sigma_t = 0.3 (51.95)^{2/3} = 4.18 \text{ MPa}$$

Cálculo para obtener σ_t para la relación a/c = 0.65 a los 28 días.

$$\sigma_t = 0.3 (31.70)^{2/3} = 3.00 \text{ MPa}$$

La tabla 5.7 muestra un comparativo entre los valores estimados con esta formula ^[68] y los obtenidos experimentalmente.

Tabla 5.7
Comparación de los resultados de las pruebas de σ_t con los valores estimados en función de $f'c$

Relación agua/cemento	Resistencia mecánica a la tensión indirecta a los 28 días. MPa		Evaluación
	Valores calculados en función de $f'c$ $\sigma_t = 0.3 (f'c)^{2/3}$ MPa	Valores obtenidos de las pruebas de laboratorio	
0.45	4.18	3.50	20% menos aprox
0.65	3.00	1.15	62 % menos aprox

Los valores estimados de σ_t en función a $f'c$, se observa que son valores más elevados que los experimentales. Como se mencionó anteriormente los valores de $f'c$ se tienen que tomar con reservas debido al elevado valor que generaron las pruebas experimentales.

Analizando el valor experimental de σ_t de la mezcla de relación $a/c = 0.65$, el porcentaje es 62% menor al calculado en función de $f'c$; esto hace suponer un posible error en este dato. Las pruebas se realizaron a una sola mezcla de las 7 llevadas a cabo, es por ello que no se puede comparar este resultado con algún otro generado, sin embargo se tienen resultados de σ_t de la misma mezcla realizada a los 90 días; con este dato se puede verificar y estimar el valor de la mezcla de relación $a/c=0.65$ a los 28 días.

El 100% de la resistencia del concreto se alcanza a los 28 días; ^[68] en la prueba realizada a los 90 días existe un incremento aproximado del 10 %, debido a que el concreto sigue adquiriendo resistencia aunque en menor porcentaje. Se utilizó este porcentaje para estimar el valor a los 28 días de la mezcla con una relación $a/c = 0.65$; así se generó un valor mas objetivo, de σ_t para esta mezcla.

Tabla 5.8
Ajuste de la σ_t de la mezcla de relación $a/c = 0.65$, a los 28 días

	Tiempo en que se realizó la prueba	Relación agua/cemento	
		$a/c = 0.45$	$a/c = 0.65$
Resistencia a la tensión indirecta MPa	28 días	3.50	2.76
	Incremento de un 10 % aprox de 28 a 90 días		Si ajustamos el valor de 28 días reduciendo un 10 % al de 90 días
	90 días	3.92	3.04

Para cuestiones de análisis de resultados serán empleados los datos de la tabla 5.9, como valores finales de σ_t .

Tabla 5.9
Valores finales de de σ_t

	Tiempo en que se realizó la prueba	Relación agua/cemento			
		$a/c = 0.45$		$a/c = 0.65$	
		lb/in ²	MPa	lb/in ²	MPa
Resistencia a la tensión indirecta	28 días	507	3.50	401	2.76
	90 días	568	3.92	440	3.04

5.7 Evaluación de la resistencia a compresión con relación a la resistencia a la tensión indirecta

Con los valores de σ_t a los 28 días de ambas mezclas es factible verificar en la figura 5.3 [68] los valores de f'_c en función de los de σ_t .

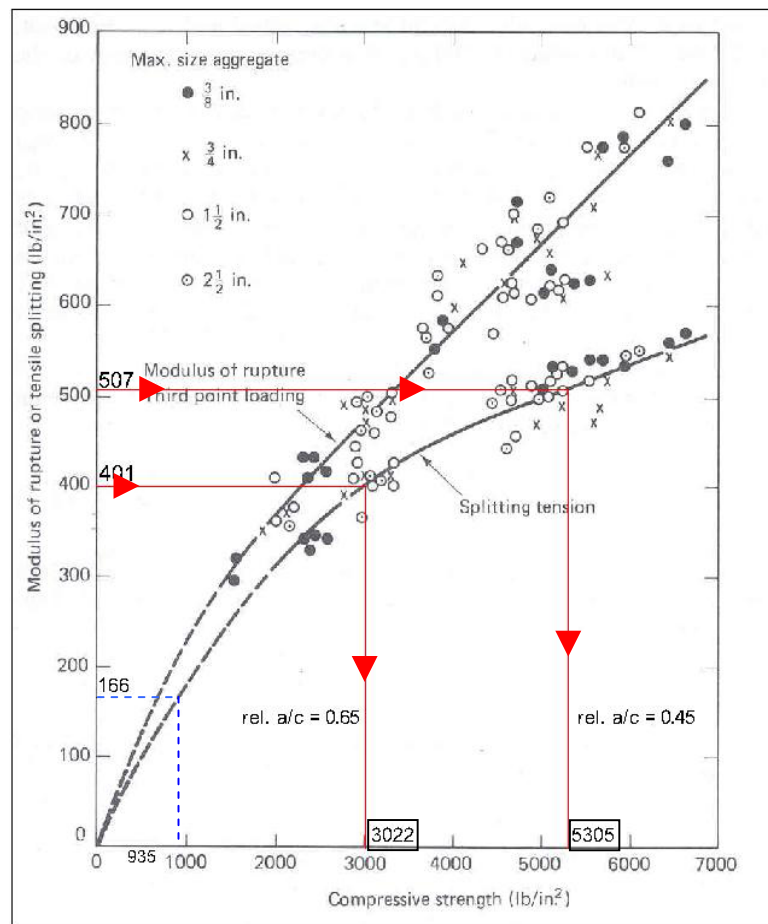


Figura 5.3
Relación de resistencia a la compresión y resistencia a la tensión en el concreto [76]

La línea punteada de la figura 5.3 es la línea del valor real de σ_t de la mezcla con relación $a/c = 0.65$, obteniéndose un valor extremadamente bajo de $f'_c = 6.45$ MPa; aunque posiblemente el valor de las pruebas de resistencia a la compresión que se reportó en las pruebas sea poco menor, no podemos afirmar que sea el valor que corresponde a σ_t a los 28 días; es por ello que se hizo un ajuste con el valor de resistencia a la tensión a los 90 días, el cual generó un valor más objetivo.

Tabla 5.10
Valores de f'_c en relación con los valores de σ_t de la figura 5.3

Relación agua/cemento	Pruebas realizadas a los 28 días			
	Resistencia mecánica a la tensión indirecta		Resistencia a la compresión	
	lb/in ²	MPa	lb/in ²	MPa
0.45	507	3.50	5305	36.58
0.65	401	2.76	3022	20.84

En la tabla 5.11, se observa que los valores que mejor se relacionan con los que recomienda la ACI 211.1, son los que se obtuvieron de la figura 5.1, que los resultaron de las pruebas de laboratorios para obtener la resistencia a la compresión.

Tabla 5.11
Comparativa de resultados de f'_c

Relación agua/cemento	Pruebas realizadas a los 28 días		
	Resistencia a la compresión		
	Valores obtenidos de la figura 4.3 ^[68] MPa	Valores de la ACI 211.1 ^[73] tabla 4.6 MPa	Valores obtenidos de las pruebas de laboratorio MPa
0.45	36.58	37.26	51.95
0.65	20.84	22.46	31.70

Debido a la escasez de datos en esta prueba, se tiene un amplio rango de incertidumbre y no se puede afirmar que los valores de f'_c que generó esta prueba sean confiables, ya que como se menciono esta prueba solo se le realizó a una mezcla de la siete fabricadas; **es por ello que recomendamos realizar a por lo menos tres mezclas por cada relación a/c.**

5.8 Análisis del modulo de elasticidad

El Módulo de elasticidad es la relación del esfuerzo normal a la deformación correspondiente para esfuerzos de tensión o de compresión, por debajo del límite de proporcionalidad de un material.

El módulo de elasticidad del concreto puede estimarse empíricamente relacionando el f'_c , considerando agregados de buena calidad y un concreto de peso específico de $2\,320\text{ kg/cm}^3$ (145 lb/ft^3), por medio de la expresión:

$$E_c = 4730\sqrt{f'_c} \quad \text{en MPa}$$

Donde:

E_c = Modulo de elasticidad del concreto.

Con los datos de f'_c que se presentan en la tabla 4.21, podemos estimar el valor de E_c .

Para la relación $a/c = 0.45$

$$E_c = 4730\sqrt{51.95} = 34092.11\text{ MPa} \approx 34.09\text{ GPa}$$

Para la relación $a/c = 0.65$

$$E_c = 4730\sqrt{31.70} = 26631.20\text{ MPa} \approx 26.63\text{ GPa}$$

La tabla 5.12, muestra un comparativo del valor estimado de E_c en función de f'_c y los valores obtenidos experimentalmente en las pruebas realizadas a las mezclas.

Tabla 5.12
Comparación de los resultados estimados de E_c en función de f'_c con los valores obtenidos en las pruebas

Relación agua/cemento	Modulo de elasticidad a los 28 días GPa		Evaluación
	Valores calculados en función a f'_c $E_c = 4730\sqrt{f'_c}$	Valores obtenidos de las pruebas de laboratorio	
0.45	34.09	20.47	40% menos aprox
0.65	26.63	18.46	30% menos aprox

Los valores experimentales de E_c son bajos de acuerdo con los que se esperaban en función de f'_c , como se muestra en la tabla anterior. En la tabla 5.13; se muestra la relación que existe entre f'_c y E_c , de acuerdo con las resistencias a la compresión obtenidas; estos valores, corresponden a un E_c de 34 GPa para la mezcla de relación $a/c=0.45$ y 28 GPa para la relación $a/c = 0.65$, estando el valor experimental muy bajo del esperado.

Tabla 5.13
Relación entre la resistencia a la compresión y el modulo de elasticidad ^[68]

Resistencia a la compresión MPa	Modulo estático GPa	Modulo dinámico GPa	Modulo estático según CEB GPa
20	25	35	29
25	26	36	30.5
30	28	38	32
40	31	40	35
50	34	42	37
60	36	44	39

La influencia que ejerce la naturaleza y la calidad del agregado grueso en la deformabilidad del concreto bajo esfuerzos es muy significativa. Para la magnitud de estos efectos se recomienda hacer la estimación mediante las siguientes expresiones:

$$E_c = 4400\sqrt{f'c} \text{ en MPa, con agregado grueso calizo}^{[8]}$$

$$E_c = 4730\sqrt{f'c} \text{ en MPa, con agregado grueso basáltico}^{[8]}$$

En este proyecto se utilizó agregado grueso basáltico como se mostró en la tabla 4.5, por lo cual el E_c se podría estimar con la fórmula que corresponde a este agregado. Pero como se ha mencionado la posibilidad de que los valores de $f'c$, sean erróneos, no se calculará mediante las fórmulas anteriores. Se estimará el E_c en función de la relación a/c de la tabla 5.14, donde se comparan módulos de elasticidad de concretos con diversas resistencias a la compresión, estimados mediante las expresiones recomendadas por el Reglamento ACI 318^[69] y por el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal,^[70] verificando el $f'c$ que corresponde dicha relación a/c y a el E_c .

Tabla 5.14
Influencia de los agregados en el modulo de elasticidad estimado del concreto a compresión

Resistencia de proyecto $f'c$ MPa	Resistencia promedio requerida f_{cr} , MPa	Relación a/c probable en masa	Módulos de elasticidad estimados, E_c , MPa		
			ACI 318 ^[69] con agregados ASTM C33	Reglamento D.F.	
				Grava caliza	Grava basáltica
20	24.5	0.62	21150	19700	15700
25	29.5	0.54	23650	22000	17500
30	35.0	0.48	25900	24100	19200
33		0.45	27160		20100
35	40.0	0.43	28000	26050	20700
40	45.5	0.38	29900	27850	22150

La tabla 5.14; muestra valores para relaciones a/c de 0.43 y 0.48; interpolamos y estimamos los valores para una relación $a/c = 0.45$, obteniendo así el valor de E_c que corresponde a esta relación; así mismo, utilizamos los valores de la relación $a/c = 0.62$ que es el valor más cercano, para la relación $a/c = 0.65$.

Obteniendo estos valores podemos hacer una comparación de los resultados generados experimentalmente y los valores estimados, bajo el criterio del Reglamento del Distrito Federal.^[70]

Tabla 5.15
Comparación de los resultados experimentales y los estimados por el Reglamento del Distrito Federal

Relación agua/cemento	Modulo de elasticidad a los 28 días. GPa		Evaluación
	Reglamento D.F. ^[70] grava basáltica	Valores obtenidos de las pruebas de laboratorio	
0.45	20.10	20.47	Muy parecidos
0.65	15.70	18.46	

Podemos afirmar que los valores experimentales de E_c del concreto son válidos, y no como se pensaba que estaban muy por debajo de los esperados. Con valores de E_c y la relación a/c estimamos los valores de f'_c , que se presentan en la tabla 5.16.

Tabla 5.16.
Estimación de f'_c de acuerdo a su E_c y a la relación a/c.

Relación agua/cemento	Modulo de elasticidad a los 28 días. G Pa	f'_c correspondiente a su E_c y a su rel. a/c ^[Tabla 4.14.]
0.45	20.10	33.0 Aprox.
0.65	15.70	20.0 Aprox.

La tabla 5.17; presenta los datos esperados de f'_c en función de las diferentes pruebas realizadas; en todos estos análisis el resultado de f'_c generó valores menores a los obtenidos en las pruebas experimentales que se realizaron al concreto. Por lo cual se confirma que los resultados de dichas pruebas son erróneos, ya que las características de diseño de ambas mezclas de concreto no corresponden a los que las pruebas generaron.

Tabla 5.17
Valores esperados de f'_c en función de sus propiedades

Relación a/c	Resistencia a la compresión f'_c (MPa)					
	f'_c en función a la relación a/c (Tabla 4.1)	f'_c en función a la cant. de cemento y contenido de aire (Tabla 4.2)	ACI 211.1 ^[67] (Tabla 4.6)	f'_c en función a σ_t (Tabla 4.10)	f'_c en función a E_c (Tabla 4.16)	f'_c experimental (Tabla 3.21)
0.45	37.26	37.30	37.26	36.58	33.00	51.95
0.65	23.53	24.38	22.46	20.84	20.00	31.70

De acuerdo a este análisis, se puede determinar que el concreto tiene una f'_c , como se muestra en la tabla 5.18.

Tabla 5.18
Valores de la estimación de f'_c

Relación agua/cemento	f'_c estimado MPa
0.45	36.28 ± 1.86
0.65	22.24 ± 1.82

5.9 Análisis de la porosidad total y la absorción total

Estas pruebas de acuerdo con la norma ASTM C 642, se realizó a dos mezclas de las siete fabricadas, dando como resultados los mostrados en la tabla 4.16, para el caso de absorción total, y la tabla 4.17, para la porosidad total.

Graficando los datos de porosidad total y absorción total, las mezclas de relación $a/c = 0.45$ y 0.65 así como su promedio, se puede ver claramente que los resultados del concreto con relación $a/c = 0.65$ Son mayores que los relación $a/c = 0.45$; esto se debe a que cuando las relaciones a/c tienden a 0.40 se discontinúan los poros capilares; y los procesos de penetración de agua se dificultan, y cuando la relación a/c tiende a 0.70 los procesos de segmentación de poros son imposibles, por lo tanto los concretos resultan ser muy permeables a pesar del grado de hidratación cercano al valor de uno. Es por ello que podemos afirmar que en esos casos se cumplen tales conceptos.

Los resultados de porosidad total y absorción total tienen que ser una correlación lineal que se obtiene del mismo ensayo. En la figura 5.4, se puede ver claramente la correlación de los resultados de las dos mezclas ensayadas, así como del promedio para cada relación a/c .

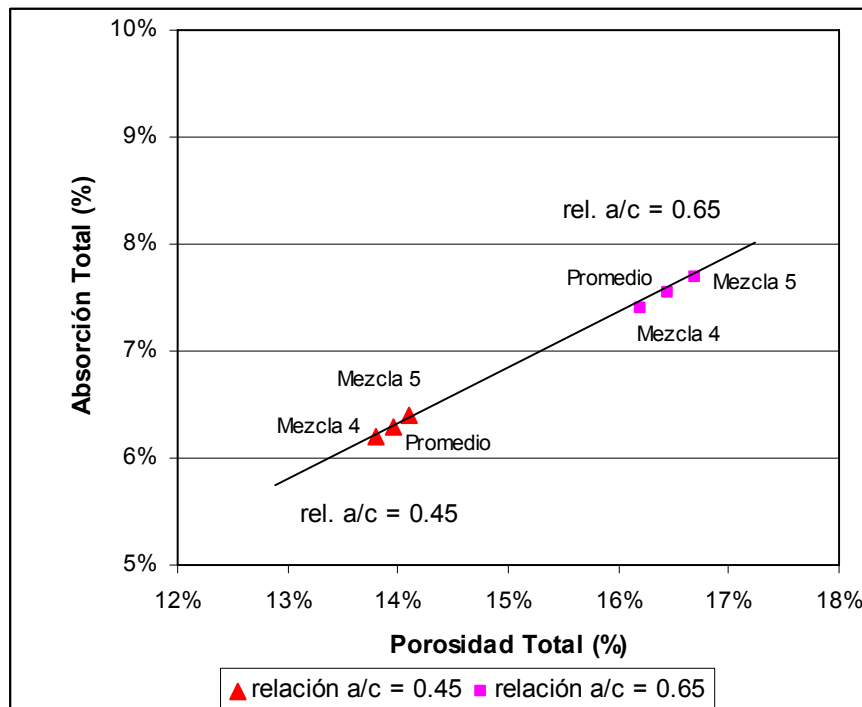


Figura 5.4
Relación de la porosidad total con la absorción total

La evaluación de la porosidad total de los concretos utilizados con el criterio del Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado (CYTED), tabla 5.19, indica que el concreto de relación $a/c=0.45$, es en promedio de 13.95%, siendo este un concreto de calidad moderada; y el concreto de relación $a/c = 0.65$ promedia 16.45%; según este criterio se concluye que de acuerdo con su porosidad el concreto es de durabilidad inadecuada.

Tabla 5.19
Criterio de evaluación de la porosidad, según el Manual de la Red DURAR

Porcentaje de Porosidad	Calidad del concreto
$\leq 10 \%$	Concreto de buena calidad y compacidad
10 % - 15 %	Concreto de moderada calidad
$> 15\%$	Concreto de durabilidad inadecuada

5.10 Análisis de los resultados de la prueba de absorción capilar. Método de ensayo de Fagerlund

La absorción es una propiedad que define la relación del agua que penetra por la porosidad del material cuando esta expuesta a una fuente de agua. La absorción es considerada como un importante criterio para evaluar la durabilidad del concreto.

Los valores de la porosidad efectiva y la porosidad total se pueden correlacionar; como se muestra en la figura 5.5, se ve que existe una tendencia que indica que la porosidad efectiva es menor que la porosidad total, ya que la primera solo denota la cantidad de poros saturados por succión capilar, sin incluir los vacíos que no están intercomunicados; y la porosidad total incluye toda la cantidad de agua que pueda ser absorbida por el concreto al ser saturado.

Así mismo, se puede corroborar que una relación a/c baja genera una porosidad baja, reduciendo en gran manera la penetración de agentes agresivos.

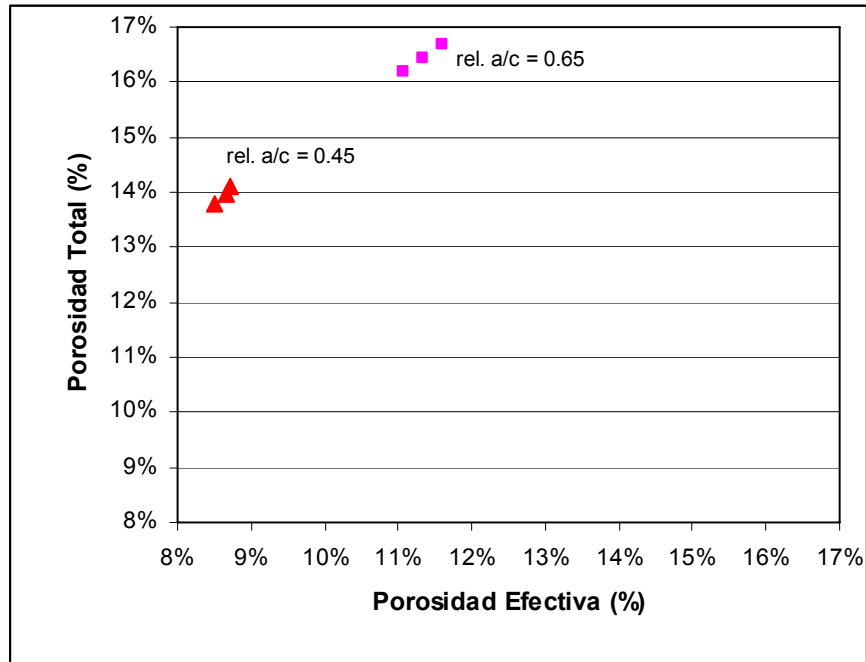


Figura 5.5
Relación entre porosidad efectiva y porosidad total

5.10.1 Absorción Capilar

La absorción capilar por el método de Fagerlund, se determina en función de tres coeficientes (m) penetración del agua, (k) absorción capilar y (ϵ_e) porosidad efectiva.

Obtenidos estos coeficientes se puede determinar la absorción capilar para cada una de las mezclas realizadas, mostradas en la tabla 5.20

Tabla 5.20
Valores de Absorción Capilar

Relación a/c	Absorción capilar	
0.45	10.20 mm/h ^{1/2}	1.70 x 10 ⁻⁴ m/s ^{1/2}
0.65	10.02 mm/h ^{1/2}	1.67 x 10 ⁻⁴ m/s ^{1/2}

En la figura 5.6 se puede observar que entre la absorción total y la absorción capilar no existe ninguna tendencia, ya que la primera representa un porcentaje de agua absorbida no garantizando el llenado de todos sus capilares en el concreto y la absorción capilar es la cantidad de agua por unidad de área que puede penetrar por sus capilares en el concreto al estar en contacto con el agua.

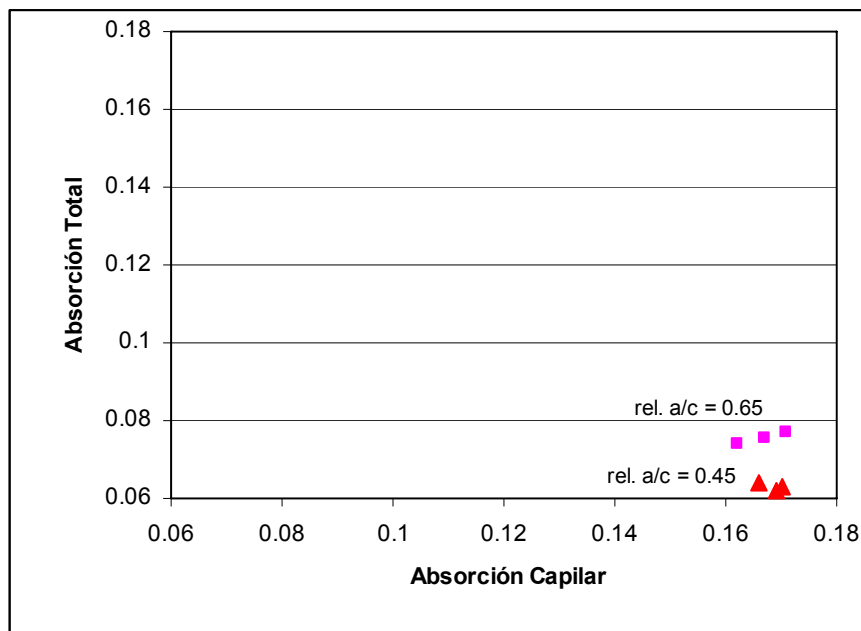


Figura 5.6
Relación entre absorción capilar y absorción total

5.11 Análisis de los resultados electroquímicos de las estaciones de campo

El Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado (CYTED), indica los parámetros de potencial de media celda [E_{corr} (mV)], que se deben de considerarse para determinar si el acero de refuerzo esta corroyéndose, Figura 5.7 y 5.8.

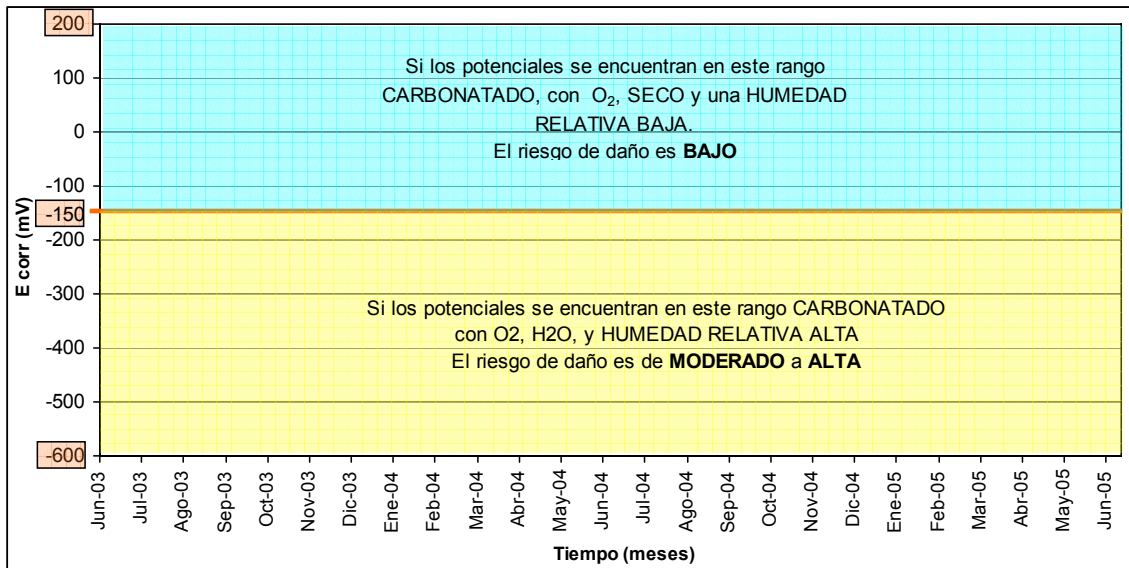


Figura 5.7

Criterio para evaluar los potenciales de media celda en condición de corrosión uniforme, en zonas urbanas de acuerdo con el Manual del CYTED

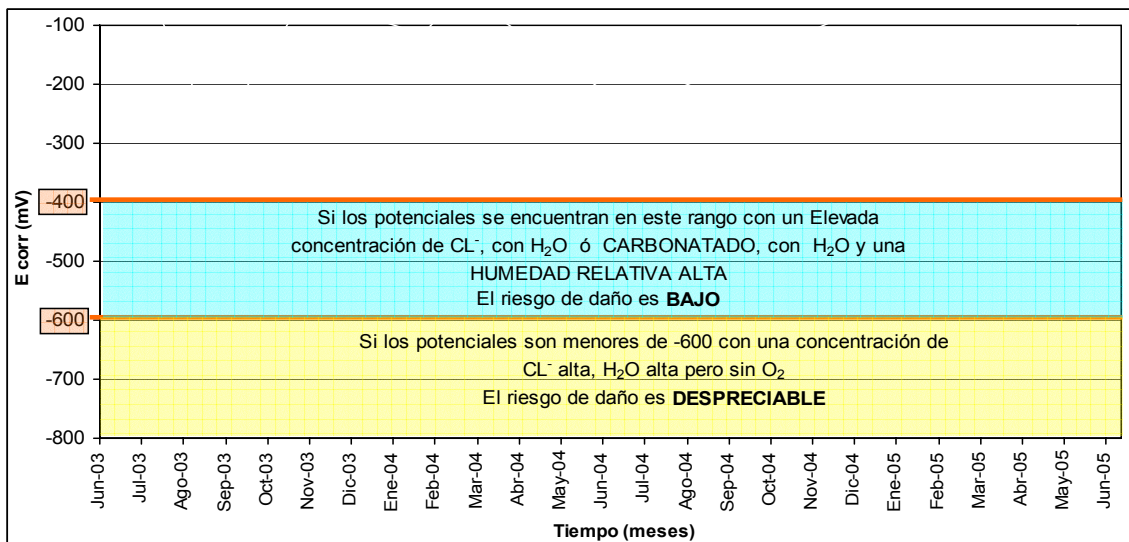


Figura 5.8

Criterio para evaluar los potenciales de media celda en condición de corrosión uniforme, alto o despreciable de acuerdo con el Manual del CYTED

La interpretación de los resultados de las pruebas de potencial de media celda [E_{corr} (mV)], se hizo de acuerdo con la Norma ASTM C 876, con los parámetros que se muestra en la tabla 2.5; y como se representa en la figura 5.9.

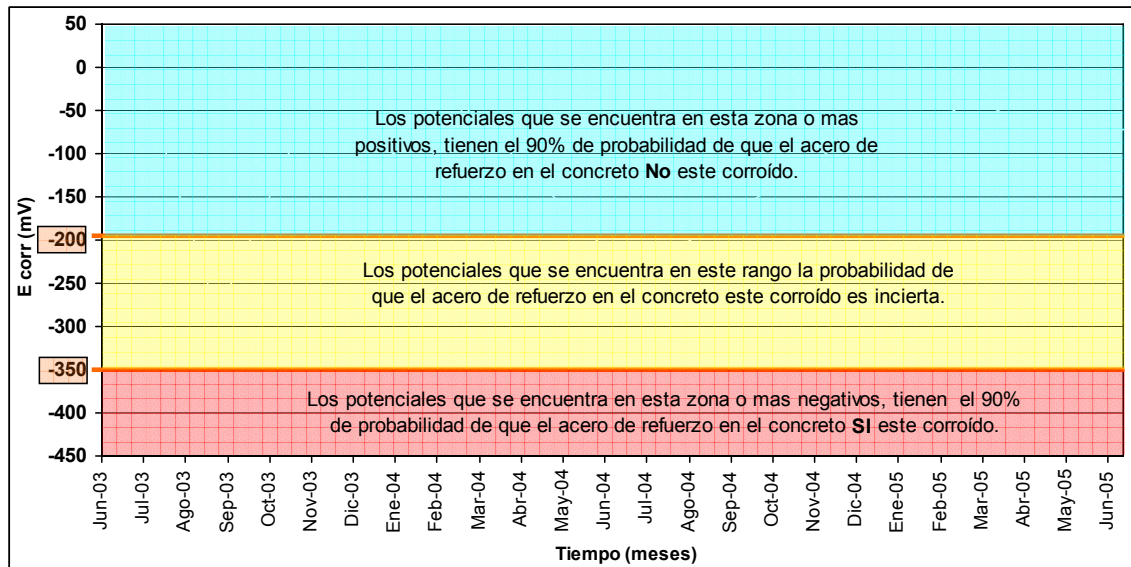


Figura 5.9

Criterio para evaluar los potenciales de media celda de acuerdo con la norma ASTM C 876 ^[66]

La evaluación de los resultados de velocidad de corrosión [I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)], se realizó utilizando el criterio recomendado en el Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado (CYTED) como lo indica la tabla 1.6 y el gráfico de la figura 5.10.

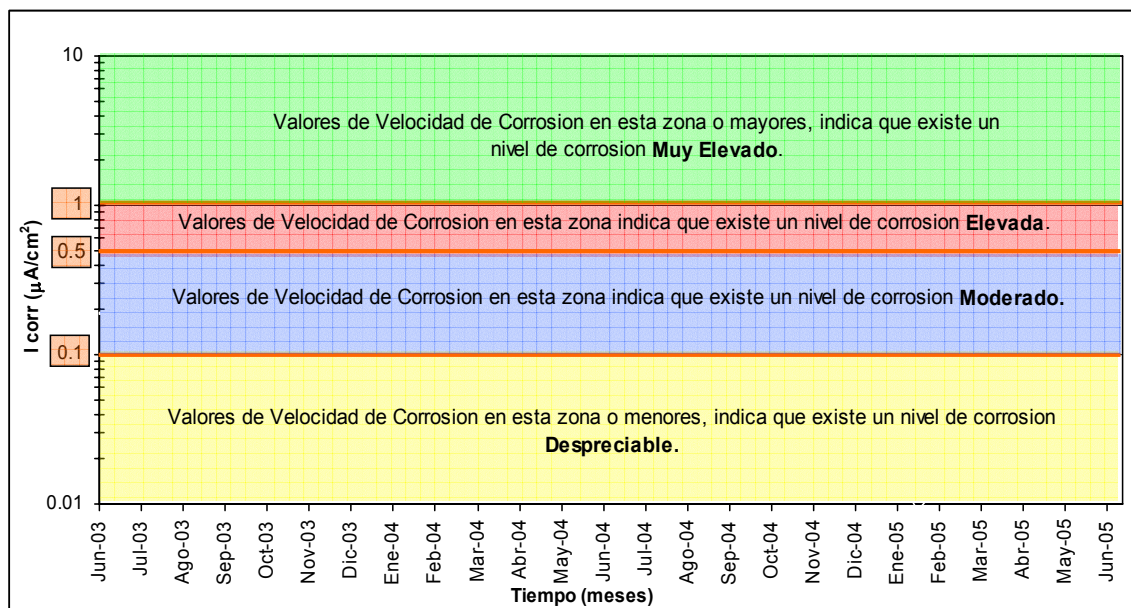


Figura 5.10

Criterio para evaluar la velocidad de corrosión de acuerdo al Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado ^[1]

Conforme a la metodología que presenta el Capítulo IV del Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado (CYTED), se analizó si los especímenes expuestos en las estaciones de campo presentan corrosión, bajo los criterios de velocidad de corrosión y potenciales de media celda, criterios que se describieron.

Estos criterios fueron analizados por cada estación de campo.

Nombre de la estación: Morelia
Código: Mx5
País: México
Atmósfera aparente: Urbano

Para la Estación de Campo Morelia (Mx5), de acuerdo con los datos de las mediciones electroquímicas registradas a partir de octubre del 2003, se puede indicar que en junio del 2005, el acero de refuerzo permaneció pasivo en el rango de velocidad de corrosión **despreciable** y con potenciales donde el acero de refuerzo indica que no tiene probabilidades de estar corroído.

Solo en el periodo de junio a julio del 2004, tanto los potenciales como la velocidad de corrosión, indican que el acero de refuerzo. **Si** se está corroyendo, esto puede asociarse con el periodo en el cual la humedad relativa promedio esta arriba del 80%, una precipitación pluvial arriba de 200 mm, así como una temperatura constante de 17°C.

Una alternativa más de evaluación es el **tiempo de humectación** que esta indica la cantidad de horas en que la superficie esta húmeda. Este puede ser el motivo por el cual el acero se este corroyendo en este periodo. Aunque sólo en ese periodo indica esta variación, manteniéndose **Pasivo**, hasta la ultima fecha de registro.

Nombre de la estación: Veracruz
Código: Mx6
País: México
Atmósfera aparente: Urbano-marina

En la estación de campo de Veracruz (Mx6), instalada en junio del 2003 y con datos registrados hasta Mayo del 2005, puede apreciarse en las graficas del Anexo B que en la ultima fecha de registro corrosión el acero de refuerzo que se encuentra inmerso en el concreto, no presenta problemas.

En el periodo inicial de junio a octubre del 2003, la velocidad de corrosión indica que el acero se corroe de manera **Moderada**, esto pudiera ser relacionado con la humedad que se conserva en la interfase acero-concreto, y porque la humedad relativa a la que se encuentran expuestas esta por arriba del 80% todo el año. Aunque los potenciales no indican que este fenómeno este sucediendo, ya que los potenciales indican que el acero no está corroído. Podríamos suponer que el acero si presento corrosión al inicio creando así la capa pasiva que es la que protegió al acero, lo cual impidió que este siguiera corroyéndose.

Nombre de la estación: México, D.F.
Código: Mx7
País: México
Atmósfera aparente: Urbano - industrial

Al momento de colocar la estación de campo se presentaron valores de velocidad de corrosión arriba de 0.1, indicando que el acero de refuerzo estaba corroyéndose, probablemente por la humedad residual que existía en la interfase del acero-concreto al momento de ser colocadas las estaciones. Aunque los potenciales de corrosión evidenciaban que el acero se encontraba pasivo.

A lo largo de dos años de exposición las mediciones electroquímicas indican, con potenciales positivos y velocidades de corrosión muy bajas que el acero de refuerzo no está sufriendo ningún deterioro por corrosión.

Existen unas varillas que han presentado velocidades de corrosión un tanto altas denotando que tienen una corrosión **moderada**, así como potenciales que indican que es incierto este fenómeno. Lo que puede determinarse, es que son varillas inmersas en especímenes de concreto con una relación a/c = 0.65, por lo cual se podría pensar que en efecto se están corroyendo debido a la alta relación agua/cemento.

Nombre de la estación: Querétaro
Código: Mx8
País: México
Atmósfera aparente: Urbano

En la estación de campo Querétaro (Mx8), durante todo el periodo de exposición no se ha presentado el fenómeno de corrosión en el acero de refuerzo inmerso en el concreto, con excepción de unas varillas en concreto con relación a/c = 0.45 que desde el inicio presentaron velocidades de corrosión arriba de 0.1 y otra arriba de 1

$\mu\text{A}/\text{cm}^2$, aunque sus potenciales nunca cayeron a la zona que indica; que efectivamente el acero estuviera corroyéndose. El valor de estos datos pudo ser resultado de la humedad que guarda en la superficie el acero de refuerzo. Los últimos registros en la estación señalan que el acero se encuentra pasivo en todos los especímenes.

Nombre de la estación: Toluca
Código: Mx9
País: México
Atmósfera aparente: Urbano-industrial

En la estación de campo Toluca (Mx9) se presentaron al inicio velocidades de corrosión arriba de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, indicando con ello que el acero de refuerzo tenía un nivel de corrosión **Moderado**, esto fue cuando se colocó la estación, a la intemperie aunque los valores de potencial de media celda evidenciaban que el acero se encontraba pasivo, posiblemente existía humedad en la interfase acero-concreto motivo por el cual se presentan esos valores.

En todo el tiempo de exposición se maneja un periodo de junio-agosto del 2003, donde se muestra (Gráficas C.49 a C.54) que el acero de refuerzo presenta valores arriba de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, indicando un nivel de corrosión **Moderado**, obteniéndose también potenciales con valores de -350 mV (Gráficas C. 55 a C.60), observando, que efectivamente el acero de refuerzo está corroyéndose. Ya que en este periodo, se presenta humedad relativa promedio arriba del 90%, la mayor precipitación pluvial en ese año, y tiempo de humectación resultó arriba de 550 mm, todo esto favoreció esto a que el fenómeno se llevara a cabo.

Nombre de la estación: Mexicali
Código: Mx10
País: México
Atmósfera aparente: Urbano

En la estación de campo de Mexicali (Mx10), se puede observar que desde el inicio se tienen valores de potenciales más positivos de -350 mV , y velocidades de corrosión abajo de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, indicando con esto que el acero de refuerzo se encuentra pasivo. En el último registro se observan que los potenciales se volvieron más negativos pero las velocidades se mantienen por debajo de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; revisando el tiempo de humectación que es muy pequeño, y humedad relativa debajo de 40%, es conveniente evaluar el perfil de carbonatación, el posible causante de problemas de corrosión.

Se realizó un análisis con el criterio de $\text{potencial} < -0.350 \text{ V vs csc}$ y otro con el criterio de $\text{potencial} < -0.250 \text{ V vs csc}$; en ambos análisis, las varillas de acero de refuerzo que se presentaron activas son las que se muestran en la tabla 5.21.

Tabla 5.21
Resumen del total de las varillas activas en cada estación con los criterios analizados

ESTACIÓN	BAJO EL CRITERIO $\text{potencial} < -0.250 \text{ V vs csc}$	BAJO EL CRITERIO $\text{potencial} < -0.350 \text{ V vs csc}$
MORELIA	30	11
VERACRUZ	13	0
MÉXICO, D.F.	9	1
QUERÉTARO	12	0
TOLUCA	34	12
MEXICALI	7	0

Con esos resultados no se puede afirmar que el acero de refuerzo este activo o pasivo, así que se revisó por otro criterio que es el de densidad de corriente. En él se analizan los valores de potencial [E_{corr}] vs densidad de corriente [velocidad de corrosión (I_{corr})]. Para el análisis con este criterio se realizaron las graficas que se presentan en el ANEXO D, en las cuales se pueden ver ambos valores y definir si el acero de refuerzo se encuentra activo, así como los valores que se encuentran debajo de -350 mV en el eje de las ordenadas; se puede decir que hay una probabilidad de un 95% de que exista corrosión, los valores mayores a $0.02 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en el eje de las abscisas indican que el acero de refuerzo esta activo.

Para determinar que las varillas de acero de refuerzo están activas debe de encontrarse en la zona de activación como lo indica la figura 5.5. Las graficas que se presentan en el ANEXO D son por cada fecha que se realizaron mediciones en cada estación.

Los valores que se presentan son para los tres recubrimientos; 1.5 cm; 2.0 cm; y 3.0 cm, para la cara expuesta (C1) y la cara resguardada (C2).

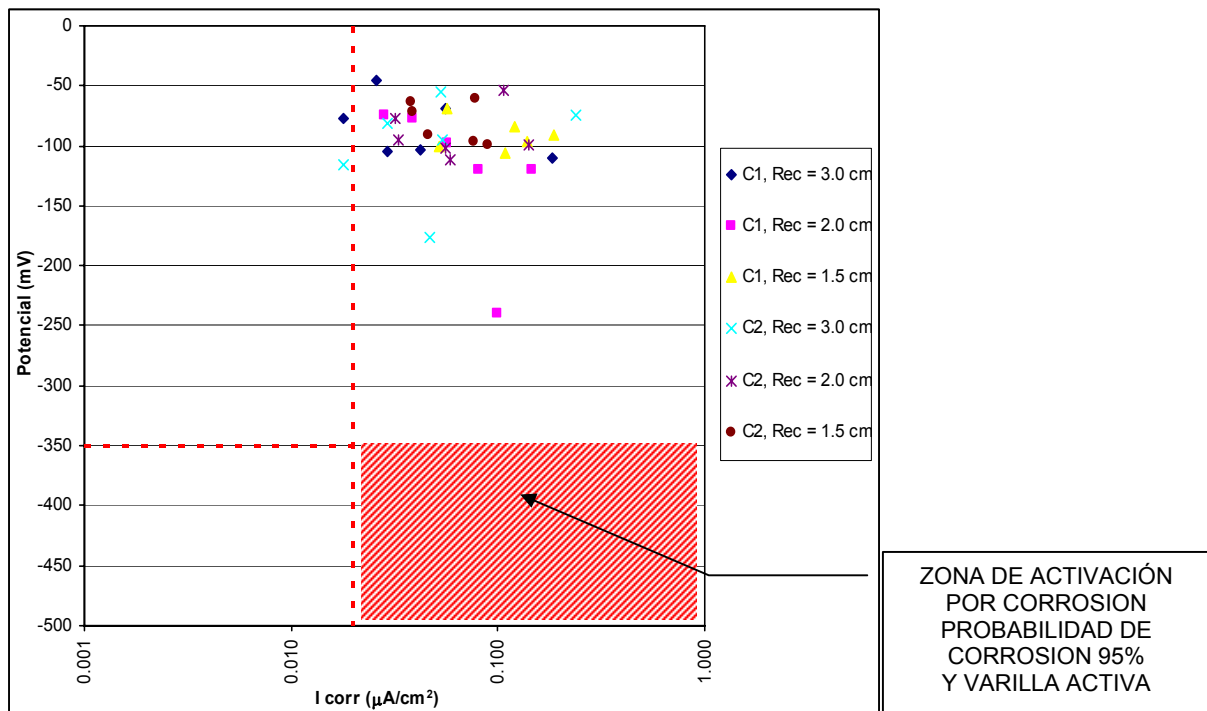


Figura 5.11
Criterio para la evaluación de densidad de corriente

Con el análisis de densidad de corriente, podemos concluir que el acero de refuerzo inmerso en los especímenes de concreto en las seis estaciones, hasta la última fecha registrada en este trabajo, puede asegurarse que el acero de refuerzo se encuentra pasivo. Y que la activación en algunos casos ha sido pasajera, y que se debió a cambios climáticos, principalmente a la presencia de humedad.

5.12 Análisis de los resultados de carbonatación de las estaciones campo.

De acuerdo con los resultados de profundidad de carbonatación (X_{CO_2}) que se obtuvieron en cada una de las estaciones, se calculó la constante de carbonatación (K_{CO_2}), para la cara expuesta (C1) y la cara resguardada (C2), con la siguiente expresión:

$$K_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}}{\sqrt{t}}$$

En las tablas 5.22 y 5.23, se presentan resultados de carbonatación de las estaciones de campo de dos periodos, aproximadamente de un año cada uno de estos.

Con la información de la estación de campo Mexicali (Mx10), se aprecia que cuando se presentan humedades relativas alrededor del 50% y temperaturas promedio altas, el proceso de carbonatación es favorable; dado que existe poca humedad el proceso de carbonatación no se genera, los datos de esta estación indican que el proceso de carbonatación si se lleva acabo, mostrando profundidades de carbonatación mayores que en otras estaciones, aunque esto no necesariamente indica que el acero se corroa, sólo cuando el frente de carbonatación llegue al acero de refuerzo, el proceso de corrosión se iniciara debido al cambio de pH y la presencia de humedad.

En el caso de la estación de campo Veracruz (Mx6), se esperaban profundidades de carbonatación altas por tener un clima de tendencia tropical, calido y húmedo durante gran parte del año, siendo estos dos factores importantes para que el proceso de carbonatación se genere, pero debido a que la humedad relativa durante todo el año se encuentra arriba del 80%, esto ocasiona que los poros del concreto se encuentren saturados de agua todo el tiempo, impidiendo que el CO_2 penetre, evitando la carbonatación.

El caso de la estación de campo México (Mx7), el proceso de carbonatación es muy lento en relación a las condiciones ambientales que presenta esta ciudad, dado que se esperaban profundidades de carbonatación mayores que en la Estación de Mexicali, ya que aquí se registran humedades relativas del 50 al 70%, siendo este el parámetro favorable para que el proceso de carbonatación se lleve acabo, el motivo por el cual los datos de carbonatación de esta estación son bajos, es debido a que la estación se encuentra en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México, por las condiciones que esta presenta se genera un microclima, siendo los resultados de ese clima y no del que se esperaba, el de un ambiente urbano.

Tabla 5.22 Resumen de resultados de carbonatación de seis estaciones de campo para el primer periodo de exposición

Estación	Rel. de la mezcla a/c	Fecha de inst. de la estación	Fecha del primer corte	Resultados del 1 ^{er} corte					Días de exposición	Tiempo en años	K _{CO2}	
				Cara exp. C1 (mm)	Cara resg. C2 (mm)	Prom. de ambas caras (mm)	Arriba (mm)	Abajo (mm)			C1	C2
TOLUCA	0.45	01/05/2003	14/12/2004	2.44	2.08	2.26	0.88	1.92	593.00	1.62	1.91	1.63
	0.65			5.80	5.47	5.63	5.92	6.58			4.55	4.29
MÉXICO, D.F.	0.45	02/04/2003	13/12/2004	1.60	1.75	1.68	1.07	2.44	621.00	1.70	1.23	1.34
	0.65			5.44	4.96	5.20	4.84	5.24			4.17	3.80
QUERÉTARO	0.45	03/05/2003	08/12/2004	0.83	0.72	0.78	0.33	1.38	585.00	1.60	0.66	0.57
	0.65			6.88	6.11	6.49	4.52	5.89			5.43	4.82
VERACRUZ	0.45	26/06/2003	01/12/2004	0.91	0.79	0.85	0.49	1.97	524.00	1.44	0.76	0.66
	0.65			4.43	4.28	4.36	2.41	4.88			3.70	3.57
MORELIA	0.45	22/10/2003	22/10/2004	1.00	1.66	1.33	0.00	0.00	366.00	1.00	1.00	1.66
	0.65			5.33	5.33	5.33	0.00	0.00			5.32	5.32
MEXICALI	0.45	01/03/2003	10/02/2005	5.85	4.81	5.33	4.78	6.81	712.00	1.95	4.19	3.45
	0.65			9.74	9.99	9.86	8.98	10.08			6.97	7.15

Tabla 5.23 Resumen de resultados de carbonatación de seis estaciones de campo para el segundo periodo de exposición.

Estación	Rel. de la mezcla a/c	Fecha de inst. de la estación	Fecha del segundo corte	Resultados del 2 o. Corte					Días de exposición	Tiempo en años	K _{CO2}	
				Cara exp. C1 (mm)	Cara resg. C2 (mm)	Prom. de ambas caras (mm)	Arriba (mm)	Abajo (mm)			C1	C2
TOLUCA	0.45	01/05/2003	21/06/2005	3.54	2.23	2.89	0.90	2.01	782.00	2.14	2.42	1.53
	0.65			8.63	8.37	8.50	5.97	6.60			5.89	5.72
MÉXICO, D.F.	0.45	02/04/2003	30/06/2005	3.50	1.95	2.73	1.10	2.59	820.00	2.25	2.34	1.30
	0.65			8.34	7.63	7.98	4.87	5.27			5.56	5.09
QUERÉTARO	0.45	03/05/2003	01/06/2005	2.72	1.75	2.24	0.40	1.77	760.00	2.08	1.88	1.21
	0.65			7.10	6.60	6.85	5.29	6.82			4.92	4.57
VERACRUZ	0.45	26/06/2003	12/09/2005	1.54	1.26	1.40	0.81	2.00	809.00	2.22	1.03	0.84
	0.65			5.72	4.93	5.33	3.41	5.28			3.85	3.31
MORELIA	0.45	22/10/2003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.65			-	-	-	-	-			-	-
MEXICALI	0.45	01/03/2003	26/07/2005	6.72	5.41	6.07	4.81	6.82	878.00	2.41	4.33	3.49
	0.65			10.99	10.03	10.51	8.99	10.11			7.09	6.47

Resultados de carbonatación para el primer periodo de exposición.



Figura 5.12
Resultados de carbonatación para el 1^{er} periodo de exposición



Figura 5.13
Resultados de carbonatación para el 2º periodo de exposición

La figura 5.12 y 5.13 presentan resultados de los valores de profundidad de carbonatación tanto para la cara expuesta (e_{C1}) como para la cara resguardada (e_{C2}); así como de la constante de carbonatación para la cara expuesta (K_{C1}) y para la cara resguardada (K_{C2}) de las trece estaciones involucradas en el proyecto, estos datos se muestran en el presente trabajo, con el fin de brindar un panorama más amplio del comportamiento del fenómeno de carbonatación de las otras siete estaciones que forman el proyecto general. Los datos presentados corresponden a las siguientes instituciones:

Mx1 Mérida	Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán
Mx2 Progreso	CINVESTAV
Mx3 Chihuahua	Centro de Investigación de Materiales Avanzados (CIMAV)
Mx4 Oaxaca	Instituto Tecnológico de Oaxaca
Mx11 Camp SMN	Servicio Meteorológico Nacional Campeche
Mx12 Camp CRIP	Centro Regional de Investigación Pesquera
Mx13 Camp ITC	Instituto Tecnológico de Campeche

Con los resultados de la determinación de K_{CO_2} y la profundidad de carbonatación (e_{CO_2}), es posible predecir el avance de la misma y el tiempo en el cual la carbonatación llegará al acero de refuerzo en el concreto, mediante la siguiente fórmula:

$$t = \left(\frac{e_c}{K_{CO_2}} \right)^2$$

El cálculo del tiempo en el cual el frente de carbonatación alcanzara al acero de refuerzo para cada uno de los recubrimientos: 15, 20 y 30 mm, tanto para los especímenes con relación $a/c= 0.45$ y 0.65 para C1 y C2; los resultados se muestran en las Tablas 5.24, 5.25, 5.26 y 5.27.

Tabla 5.24
Tiempo en el que el frente de carbonatación alcanzará el acero de refuerzo para la mezcla de relación a/c= 0.45, para el primer periodo de exposición

ESTACIÓN	Rel a/c	TIEMPO (años)						K mm.año ^{-0.5}	
		Cara expuesta			Cara resguardada			PRIMER PERIODO	
		Para un recubrimiento (mm)			Para un recubrimiento (mm)				
		15	20	30	15	20	30	C1	C2
MEXICALI	0.45	12.83	22.82	51.34	18.94	33.66	75.74	4.19	3.45
TOLUCA	0.45	61.46	109.25	245.82	84.22	149.73	336.89	1.91	1.63
MÉXICO, D.F.	0.45	148.91	264.73	595.65	125.48	223.07	501.90	1.23	1.34
MORELIA	0.45	225.62	401.10	902.47	81.88	145.56	327.50	1.00	1.66
VERACRUZ	0.45	386.28	686.73	1545.13	517.57	920.12	2070.27	0.76	0.66
QUERÉTARO	0.45	519.29	923.18	2077.15	693.49	1232.87	2773.97	0.66	0.57

De acuerdo con los datos obtenidos el frente de carbonatación alcanzará primero el acero de refuerzo en todos sus recubrimientos en la estación Mexicali (Mx10), y la que presentará el último lugar en el que el frente llegue al acero es la estación de Querétaro (Mx8), estos pronósticos se generan de las mediciones del primer periodo de exposición, de acuerdo con el siguiente orden:

- 1°. Mexicali
- 2°. Toluca
- 3°. México, D.F.
- 4°. Morelia
- 5°. Veracruz
- 6°. Querétaro

La tabla 5.25 muestra los tiempos estimados obtenidos a partir de las mediciones del segundo periodo, estos datos son muy semejantes a los reportados en el segundo periodo, aunque cabe mencionar que son menores que los generados en el primer periodo, indicando que inicialmente la penetración de CO₂, fue menor en el primer periodo, que en el segundo periodo; esto reduce el tiempo estimado para que el frente de carbonatación alcance el acero de refuerzo.

Tabla 5.26

Tiempo en el que el frente de carbonatación alcanzará el acero de refuerzo para la mezcla de rel. $a/c=0.65$, para el 1er. periodo de exposición

ESTACIÓN	Rel a/c	TIEMPO (años)						K mm.año ^{-0.5} PRIMER PERIODO	
		Cara expuesta			Cara expuesta			C1	C2
		Para un recubrimiento (mm)			Para un recubrimiento (mm)				
15	20	30	15	20	30				
MEXICALI	0.65	4.63	8.23	18.52	4.40	7.82	17.60	6.97	7.15
QUERÉTARO	0.65	7.63	13.56	30.51	9.67	17.19	38.68	5.43	4.82
MORELIA	0.65	7.94	14.12	31.77	7.94	14.12	31.77	5.32	5.32
TOLUCA	0.65	10.87	19.33	43.48	12.24	21.75	48.95	4.55	4.29
MÉXICO, D.F.	0.65	12.94	23.01	51.76	15.58	27.70	62.32	4.17	3.80
VERACRUZ	0.65	16.43	29.20	65.71	17.64	31.36	70.57	3.70	3.57

Tabla 5.27

Tiempo en el que el frente de carbonatación alcanzará el acero de refuerzo para la mezcla de rel. $a/c=0.65$, para el 2° periodo de exposición

ESTACION	Rel a/c	TIEMPO (años)						K mm.año ^{-0.5} SEGUNDO PERIODO	
		Cara Expuesta			Cara Expuesta			C1	C2
		Para un recubrimiento (mm)			Para un recubrimiento (mm)				
15	20	30	15	20	30				
MEXICALI	0.65	4.48	7.97	17.93	5.38	9.57	21.53	7.09	6.47
TOLUCA	0.65	3.77	6.69	15.06	7.55	13.42	30.19	7.73	5.46
MEXICO,D.F.	0.65	9.04	16.06	36.14	8.01	14.24	32.04	4.99	5.30
QUERETARO	0.65	9.30	16.53	37.19	10.76	19.13	43.05	4.92	4.57
VERACRUZ	0.65	15.22	27.06	60.87	20.51	36.46	82.04	3.85	3.31
MORELIA	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Los tiempos estimados para que el frente de carbonatación alcance el acero de refuerzo para la relación $a/c = 0.65$ son muy pequeños, indicando así que las estructuras con relación a/c altas, presentarán problemas de carbonatación a edades tempranas; siendo no recomendables estas relaciones a/c para estructuras con diseños de vida útil amplios, o en su defecto proponer recubrimientos arriba de 30 mm, o como lo recomienda la ACI recubrimientos mayores de 50 mm, para que el frente de carbonatación tarde en alcanzar el acero de refuerzo.

El orden de estimación en las estaciones para que el frente de carbonatación alcance el acero de refuerzo es variable entre el primer y segundo periodo.

Primer periodo	Segundo periodo
1º. Mexicali	1º. Mexicali
2º. Querétaro	2º. Toluca
3º. Morelia	3º. México, D.F.
4º. Toluca	4º. Querétaro
5º. México, D.F.	5º. Veracruz
6º. Veracruz	- Morelia - No se tiene dato

Las diferencias entre el primer periodo y el segundo es debido a que el modelo con el que se está estimando el tiempo, recomienda tener el menos dos mediciones, ya que así aumentará la certeza de la información. Es por ello que podemos afirmar que los resultados del segundo periodo son más confiables que los del primer periodo. Esto se puede afirmar por el orden que guardan las estaciones de relación a/c = 0.45 y 0.65.

Segundo periodo	
Relación a/c = 0.45	Relación a/c = 0.65
1º. Mexicali	1º. Mexicali
2º. Toluca	2º. Toluca
3º. México, D.F.	3º. México, D.F.
4º. Querétaro	4º. Querétaro
5º. Veracruz	5º. Veracruz
- Morelia - No se tiene registro	- Morelia - No se tiene registro

Para determinar si una estructura ubicada en un ambiente urbano-marino presentará corrosión por carbonatación o por cloruros, es necesario realizar un análisis e identificar la presencia de cloruros y la profundidad carbonatación en el concreto. En un concreto nuevo con pH de 12 a 13, se requieren aproximadamente 7000 a 8000 partes por millón (ppm) de cloruros para iniciar la corrosión del acero que se encuentra dentro del concreto. Sin embargo, si el pH baja a un rango de 10 a 11, el umbral de cloruros para la corrosión es significativamente menor de 100 ppm o menos ^[16] Por esta razón no se puede afirmar que una estructura se está corroyendo sólo con un análisis de profundidad de carbonatación, sino que se debe incluir un análisis de cloruros en el concreto.

Es por ello que aunque en la estación de campo Veracruz (Mx6), clasificada como ambiente urbano-marino, se proyecta un tiempo muy amplio para que el frente de carbonatación alcance al acero de refuerzo; esto no significa que el acero no se va a corroer antes, ya que el proceso de corrosión puede generarse por cloruros y no por carbonatación. Es por ello que es difícil predecir el tiempo en que la estructura comenzará a corroerse, sólo con un parámetro; es importante conocer ambos parámetros, principalmente en ambientes marinos.

Cuando en una estructura el frente de carbonatación llega al acero de refuerzo y no existe humedad, la corrosión en el acero de refuerzo no se presentará, únicamente al existir humedad, el acero de refuerzo empezará a corroerse.

6 Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

El deterioro por corrosión de la infraestructura de concreto reforzado es un fenómeno cuyo proceso involucra la interacción continua del medio ambiente con el concreto.

Con los resultados del presente trabajo de tesis podemos concluir:

- Los resultados de las pruebas a la compresión simple $f'c$ son erróneos; esto pudo haber sido por una mala calibración del equipo, o por causas ajenas al personal encargado del proyecto. Con información y valores de otras pruebas realizadas al concreto se determinó el valor real de $f'c$ siendo este para la relación $a/c = 0.45$ un $f'c = 36.28 \pm 1.86$ MPa y para la relación $a/c = 0.65$ un $f'c = 22.24 \pm 1.82$.
- Los resultados de las pruebas de tensión indirecta a los 28 días son los esperados para las relaciones a/c realizadas, con excepción del valor que se presenta para la mezcla con relación $a/c = 0.65$, pudiendo obtener el valor real con los datos de las pruebas que se realizaron a los 90 días.
- El módulo de elasticidad aparentemente era muy bajo; realizando el análisis de estos valores concluimos que los valores que generaron esta prueba son correctos, y el motivo por el cual son bajos, se debe al tipo de agregado grueso que se utilizó, que fue un agregado basáltico.
- Los valores de porosidad y absorción confirman que un concreto con una relación a/c baja, es menos permeable que un concreto con una relación a/c alta, disminuyendo el ingreso de químicos agresivos hacia su interior, y controlando el contenido de humedad durante cambios ambientales, aumentando su durabilidad.

El análisis de los parámetros ambientales en cada estación de campo proporcionó información para observar los cambios climáticos así como determinar el tipo de ambiente predominante en la estación.

El análisis electroquímico realizado a los especímenes de concreto expuestos en las estaciones de campo indica que el acero de refuerzo se ha mantenido pasivo desde el inicio y durante el tiempo de exposición; sólo presenta activación pasajera debido a los cambios climáticos principalmente cuando la humedad es alta. Esto señala que las estructuras de concreto reforzado no presentarán problemas de corrosión al inicio de su vida útil; por eso es importante que el concreto sea de buenas condiciones ya que este protegerá al acero y garantizará que el acero se mantenga pasivo, evitando problemas de corrosión.

El problema de carbonatación se presenta con mayor severidad en ambientes urbanos con humedades relativas bajas y con temperaturas altas, aunque grandes profundidades de carbonatación no indica que el acero de refuerzo se corroa, ya que es necesario que exista humedad para que la corrosión inicie.

Podemos decir que una estructura es durable cuando cumple con la capacidad de resistir la acción del intemperismo, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro; la infraestructura de concreto reforzado durable mantendrá su forma original, calidad y capacidad de servicio cuando esté expuesto a su medio ambiente.

Es indispensable incluir una rutina de inspección en la infraestructura de concreto, así como promover una normativa que incluya una evaluación con técnicas electroquímicas para poder asegurar las condiciones del acero de refuerzo.

6.2 Recomendaciones

Es una obligación considerar las condiciones de exposición y servicio de cada estructura, y tomar las medidas preventivas al respecto. En la infraestructura existente, que es la que actualmente presenta problemas de corrosión la recomendación es: realizar evaluaciones de campo continuas con personal y equipo calificado, esto ayudara a conocer el deterioro que presentan y así evitar fallas catastróficas a corto o mediano plazo, esto también ayudara a minimizar los costos de mantenimiento, si se logra detectar el problema a tiempo, y proponer una solución adecuada.

Se recomienda que los análisis de costos de cada proyecto no deban realizarse tomando como base el costo inicial del proyecto, sino que incluya el costo del mismo para el tiempo de vida útil que se desea garantizar.

La tabla 6.2.1 muestra una clasificación ambiental en forma general, aunque cabe aclarar que cada sitio tiene características únicas y variables con el transcurso del tiempo en que la estructura va a permanecer ahí, ya que el ambiente no es un parámetro controlable ni permanente, pero es necesario definir el tipo de ambiente predominante al que va ha estar expuesta, conociendo factores como: la temperatura promedio; la precipitación pluvial; la humedad relativa; el tiempo de humectación. Estos parámetros indican una clasificación ambiental aproximada.

El diseño estructural de la infraestructura de concreto reforzado es una garantía de su adecuado comportamiento estructural, y una evidencia de su capacidad de resistir las cargas que actúen sobre él, pero no garantiza la durabilidad de la estructura ya que ésta depende de otros factores ajenos al estructural; es importante que también se satisfaga los requisitos de durabilidad, según el ambiente al que va estar expuesta la estructura (tabla 6.2.2); independientemente del diseño estructural, se recomienda satisfacer los requisitos de durabilidad según el ambiente predominante al que va estar expuesta la estructura durante su vida útil.

Tabla 6.2.1
Clasificación de exposición ambiental ^[79]

Clase de exposición	Condiciones ambientales
1	Ambiente seco
2a	Ambiente húmedo sin congelamiento
2b	Ambiente húmedo con congelamiento
3	Ambiente húmedo con congelamiento y agentes descongelantes
4	Ambiente marino
5a	Ambiente de agresividad química ligera
5b	Ambiente de agresividad química moderada
5c	Ambiente de agresividad química alta
5d	Ambiente de agresividad química muy alta

Tabla 6.2.2
Requisitos de durabilidad según la clase de exposición ^[79]

Requisito		1	2a	2b	3	4	5a	5b	5c	5d
f _c	Reforz	≥200	≥250	≥250	≥250	≥300	≥250	≥300	≥350	≥350
	Presf	≥250								
a/c	Reforz	≤0.6	≤0.6	≤0.55	≤0.55	≤0.55	≤0.55	≤0.50	≤0.45	≤0.45
	Presf	≤0.6	≤0.6							
c.c	Reforz	≥270	≥300	≥300	≥300	≥300	≥300	≥300	≥300	≥300
	Presf	≥300	≥300	≥300	≥300					
c.a	≤40mm					≥4				
	≤20mm					≥5				
	≤10mm					≥6				

Durante la vida de servicio, la infraestructura de concreto reforzado se encuentra expuesta a diversos ambientes, pero cuando en el ambiente existen altas cantidades de CO₂, la manera para prevenir la corrosión por carbonatación consiste en proveer un concreto que se oponga a la penetración de CO₂. Una manera de lograrlo es la fabricación de concretos con una porosidad y absorción muy baja, así como un recubrimiento generoso, como los que se recomiendan a continuación:

Tabla 6.2.3
Recubrimientos recomendados para el acero de refuerzo [79]

Tipo de exposición	Refuerzo normal (mm)	Preesforzado (mm)
1	15	25
2a y 2b	30	35
3 y 4	40	50
5a, 5b, 5c y 5d	Depende del tipo de ambiente	

Las consideraciones más importantes para tener una estructura de concreto reforzado durable, se obtiene a partir de un concreto de buena calidad que cumpla con factores como: baja permeabilidad con ello se garantiza con una relación a/c baja, una compactación adecuada que minimice la cantidad de vacíos en el concreto garantizando así baja porosidad del mismo, esto se logra con un buen vibrado. El curado juega un papel muy importante para la vida futura de la estructura, ya que un buen curado garantizará que la estructura obtenga la resistencia para la cual fue diseñada.

Todo esto se puede verificar mediante diversas pruebas que se deben realizar al concreto y no solo confiar en los resultados de $f'c$ de diseño, ya que como en este proyecto, aunque el $f'c$ estaba erróneo, se pudo obtener el dato real y garantizar la resistencia adecuada, gracias a las pruebas que se realizaron al concreto.

Se recomienda que los reglamentos y especificaciones dedicados a durabilidad sean considerados a nivel de obligatorio, ya que esto garantizará un gran ahorro en mantenimientos y reconstrucciones futuras. Ya que la durabilidad de las estructuras de concreto sólo se puede satisfacer si su diseño y ejecución se consideran de forma íntegra, esto es realizando un adecuado y detallado diseño estructural, una selección correcta del tipo, características y calidad de los componentes a utilizar, una correcta elaboración de la de la mezcla; y por último, la aplicación de buenas prácticas constructivas durante la colocación, consolidación y curado de la estructura.

7 Referencias

Trocónis de Rincón Oladis y miembros de la Red DURAR. Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado.- CYTED.- Tercera Edición.- Maracaibo, Venezuela. Agosto 2000. pp. 13-14, pp. 21, pp. 38-40

http://portal.sct.gob.mx/SctPortal/appmanager/Portal/Sct?_nfpb=true&_pageLabel=B20045

<http://www.imt.mx/siget/galinfoquen7.htm>

<http://www.imt.mx/siget/galinfoquen9.htm>

Helene Paulo, Pereira Fernanda.- Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón, Reparación, Refuerzo y Protección.-CYTED.-Brasil.-Septiembre 2003. pp.46,47

Lee Orantes Francisco.- Tesis Refuerzo-Protección en Estructuras de Concreto Dañadas por Corrosión, utilizando Fibras de Grafito como Protección Catódica.- Celaya, Gto., México.- 2005.

Torres Acosta A. A.- Periodo de iniciación de la Corrosión (T1) en Estructuras de Concreto Expuestas a un Ambiente Marino.- Revista Internacional Construlink (RCI).- V.2, No. 5, Construlink.- ISSN 1645-576.- 2004.

Mena Ferrer Manuel.- Durabilidad de Estructuras de Concreto en México.- IMCYC.- Primera Edición.- México.- 2005. pp. 31-32, pp. 90, pp. 34

Vázquez Marcela, Fernández Raúl.- Revistas Ciencia Hoy en Línea.- Volumen 14- Nº.82.- Mar de Plata, Argentina.- Agosto-Septiembre 2004.

Trocónis de Rincón Oladis.- Influencia de la acción del medio ambiente en la durabilidad del concreto, Proyecto XV.3, DURACON Documento 1.-CYTED.- Maracaibo, Venezuela.

Comité Européen du Béton.- Design Guide to Durable Concrete Structures.- Thomas Therford Publishers.- G.9.- 1992.

Hansson C.M.- Concrete: The Advances Industrial Material of the 21st Century.- Metallurgical and Materials Transactions A.- Vol. 26 A.- EUA.- 1995.

Castro Borges Pedro.- El umbral de los cloruros para despasivar el acero de refuerzo, Criterios y resultados en el mundo.- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.- Revista Construcción y Tecnología.-México.-Enero 2001.

Francois R. y Arliguie G.- Durability of Loaded Reinforced Concrete In Chloride Environment.- ACI SP-145.- American Concrete Institute.- EUA.- 1994.

Tuutti K.- Corrosion of Steel in Concrete.- Swedish Cement and Concrete Research Institute.- Suecia.- 1982.

Rick Montani.- La carbonatación, enemigo olvidado del concreto.- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.- Revista Construcción y Tecnología.-México.-Diciembre 2000.

ACI Comité 222.- Informe 222R.- Protection of Metals in Concrete Against Corrosion.- American Concrete Institute.- EUA.- 2002.

Troconis de Rincón Oladis.- Memorias del Curso de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado.- México, Querétaro.- Octubre 2005.

NMX – C – 414 .- Industria de la Construcción.- Cementos Hidráulicos.- Especificaciones y Métodos de Prueba.- ONNCCE.- México 1996.

ASTM C 150.- Standard Specification for Portland.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1999.

IMCYC.- Para hacer un buen concreto.- Conceptos Básicos del Concreto.- Capitulo 01.- México.- Junio 2004.

ASTM C 494 / C 494M.- Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1999.

ASTM C 1017 / C 1017M.- Standard Specification for Chemical Admixture for Use in Producing Flowing Concrete.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1998.

ASTM C 1064/ C 1064M.- Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Portland Cement Concrete.- EUA.- 1999.

ASTM C 143/ C 143M.- Standard Test Method for Slum of Hydraulic-Cement Concrete.- EUA.- 2000.

ASTM C 1362.- Standard test Method for flow of Freshly Mixed Hydraulic Cement Concrete .- EUA.- 1997.

ASTM C 29/ C 29M.- Standard Test Method for Bulk density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate.- EUA.- 1997.

ASTM C 138/ C 138M.- Standard Test Method for Density (Unit Wigh), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete.- EUA.- 2001.

- NMX C 157.- Determinación del contenido de aire del concreto.- México .- 1987.
- ASTM C 231.- Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method.- EUA.- 1997a.
- ASTM C 232.-Standard Test Methods for Bleeding of Concrete.- EUA.- 1999.
- NMXC159.- Concreto – Elaboración y curado en el laboratorio.- 1985
- ASTM C 39 / C 39M.- Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens .- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 2001.
- ASTM C 192 / C 192M.- Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 2000.
- NMX C 83.- Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto. Método de Prueba.- ONNCCE.- México.- 2002.
- ASTM C 496.- Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1996.
- ASTM C 78.- Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading).- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 2000.
- NMX C 191.- Determinación de la Resistencia a la Flexión del Concreto Usando una Viga Simple con carda en los Tercios del Claro.- ONNCCE.- México.- 1996.
- ASTM C 469.- Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1994.
- NMX C 128.- Industria de la Construcción. Concreto Sometido a Compresión. Determinación del Módulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson.- ONNCCE.- México.- 1997.
- ASTM C 157 / C 157M.- Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1999.
- ASTM C 642.- Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1994.

Fagerlund G.- On the Capillarity of Concrete.- Nordic Concrete Research.- No.1, Ppe No. 6.- Oslo.- 1986.

ASTM C 1202.-Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.- American Society for Testing and Materials- EUA.- 1997.

ASTM C 666.- Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1997.

[46] ASTM C 682.- Standard Practice for Evaluation of Frost Resistance of Coarse Aggregates in Air-Entrained Concrete by Critical Dilatation Procedures.- EUA.- 1994.

[47] ASTM C 671.- Standard Test Method for Critical Dilation of Concrete Specimens Subjected to Freezing.- EUA. 1994.

[48] ASTM C 418.- Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1998.

[49] ASTM C 779/ C 779M.- Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 2000.

[50] ASTM C 944.- Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1999.

[51] ASTM C 1138.- Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method).- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1997.

[52] APASCO, Centro Tecnológico del Concreto.- Resumen de Resultados solicitud CTC-PR-02-032.- Toluca, Estado de México.- 2002.

[53] ASTM C 33 .- Standard Specification for Concrete Aggregates.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 2001.

[54] ASTM C 94 / C 94M.- Standard Specification for Ready-Mixed Concrete.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 2000.

[55] ASTM C 309.- Standard Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds for Curing Concrete.- EUA.- 1998a.

ASTM C 1152.- Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.- EUA.- 1997.

- ASTM C 1411.- Standard Test Methods for water-soluble Chlorides present as Admixes in Graded Aggregate Road Mixes.
- APASCO, Centro Tecnológico del Concreto.- Análisis Químico del Cemento Tipo CPO 30 RS.- Planta Orizaba, México.- correspondiente al mes de Febrero del 2001.
- Dr. Rigoberto Ruiz Barragán.- Estudio Petrográfico de la Muestra de Arena del Río Balsas, Mich.- México.- 2002.
- ASTM C 289.- Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method).- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1994.
- APASCO, Centro Tecnológico del Concreto.- Prueba de reactividad potencial de los agregados con los álcalis del cemento por el método químico.- Solicitud CTC-PR-02-034, Ensaye No. RAAQ-13.- Toluca, Estado de México.- 2002.
- APASCO, Centro Tecnológico del Concreto.- Prueba de reactividad potencial de los agregados con los álcalis del cemento por el método químico.- Solicitud 2001-29/P, Ensaye No. RAAQ-26.- Toluca, Estado de México.- 2001.
- Sikament[®]-190 CR.- Hoja Técnica.- Identificación no. DCT-HT-PF101200-03-05 Edición 1, 2005.
- RILEM CPC-18.- "Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth".- Materials and Structures.- Volumen 21, Numero 126 .- 1998.
- UNE 112-011-94.- "Determinación de la Profundidad de Carbonatación en Hormigones Endurecidos y Puestos en Servicio".- Norma Española.
- ASTM C 876.- Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1999.
- ACI 311-92 .- Manual para Supervisar Obras de Concreto .- Instituto Mexicano del Concreto y del Cemento.- Mexico D.F.- 1994.
- Mindess Sidney, Young Francis J.- Concrete.- Prentice.- Hall, Inc Englewood Cliffs, New Jersey.- 1981.
- ACI Comité 318. Informe 318.- Building Code Requirements for Structural Concrete.- American Society Institute.- EUA.- 2002.
- Reglamento de Construcciones del Distrito Federal.- Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción del Estructuras de Concreto. México.- 2003.

NMX C 265.- Industria de la Construcción. Agregados para Concreto. Examen Petrografico. Método de prueba.- ONNCCE.- México.- 1984.

ASTM C 295.- Petrographic Examination of Aggregates for Concrete.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1998.

ACI Comité 211. Informe 211.1.- Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete.- American Society Institute.- EUA.- 1991.

ACI Comité 309. Informe 309.3R.- Guide Consolidation of Concrete in Congested Areas.- American Society Institute.- EUA.- 1992.

ASTM C 1017.- Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1998.

S. Walker and D.L. Bloem.- Journal of the American Concrete Institute.- Vol 57, No.3, pp 283-298

A.M. Neville.- Properties of Concrete.- Fourth Edition .- England .- 1996.

Adapted from Concrete Manual,, U.S. Bureau of Reclamation.- 8th edition- Denver, Colorado.- 1975.

Moreno Eric.- Diseño de Mezclas.- Memorias del Curso de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado.- México, Querétaro.- Octubre 2005.

ANEXO A

MÉTODO DE ENSAYO DE FAGERLUND. [43]

Ensayo 1. Para un concreto con una relación agua/cemento = 0.45

Tabla A.1. Datos del ensayo 1 de la prueba de absorción capilar.

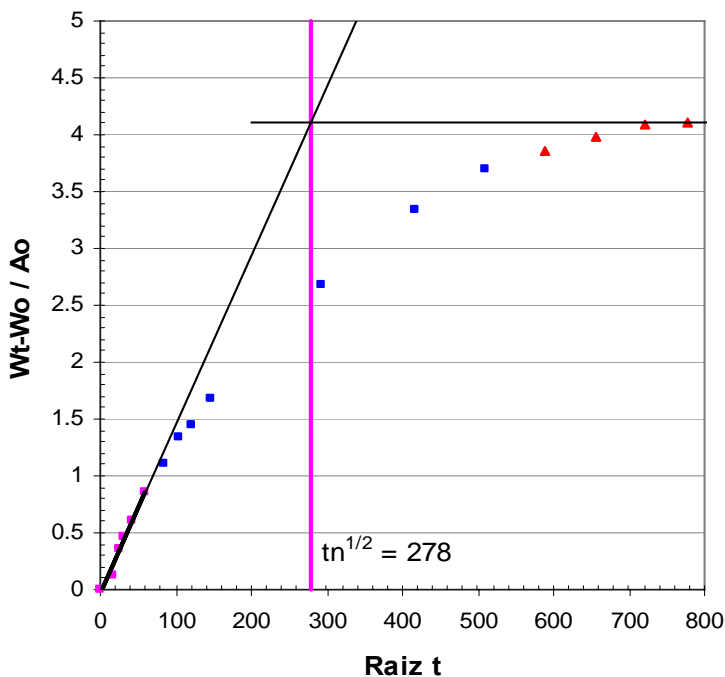
Tiempo seg	Raíz cuadrada (seg) ^{0.5}	Altura (z) m	Wt kg	Wt -Wo/Ao kg/m ²
0	0.000		0.92830	0.0000
298.8	17.286		0.9294	0.1300
601.2	24.519		0.9313	0.3544
900	30.000		0.9322	0.4608
1800	42.426		0.9335	0.6144
3600	60.000		0.9355	0.8507
7200	84.853		0.9377	1.1106
10800	103.923		0.9396	1.3351
14400	120.000		0.9406	1.4532
21600	146.969		0.9425	1.6777
86400	293.939		0.9509	2.6701
172800	415.692		0.9566	3.3436
259200	509.117		0.9596	3.6980
345600	587.878		0.9610	3.8634
432000	657.267		0.962	3.9816
518400	720.000	0.047	0.9629	4.0879
604800	777.689	0.047	0.9631	4.1115

$a/c = 0.45$

$H = 0.047 \text{ m}$

$W_o = 0.9283 \text{ kg}$

$A = 0.008464 \text{ m}^2$



Resultados obtenidos de la Grafica 1.

$k = 0.0147 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{seg}^{1/2}}$

$t_n = 77284 \text{ seg}$

$m = 3.50E+07 \frac{\text{seg}}{\text{m}^2}$

$\epsilon_e = 8.723 \%$

$S = 1.69E-04 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2}$

Gráfica A.1. Cambio de peso de la probeta por unidad de área, en intervalos de tiempo del Ensayo 1 con una relación $a/c = 0.45$.

Ensayo 2. Para un concreto con una relación agua/cemento = 0.45

Tabla A.2. Datos del ensayo 2 de la prueba de absorción capilar.

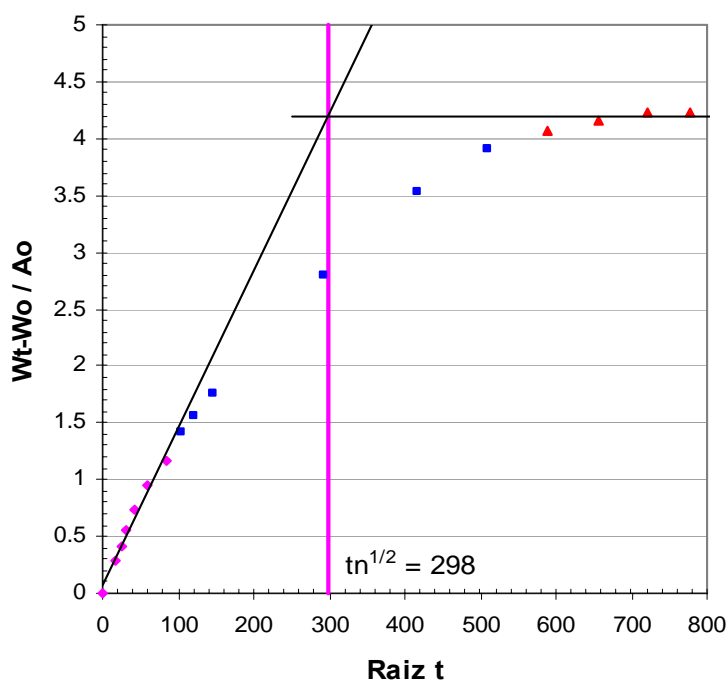
Tiempo seg	Raíz cuadrada (seg) ^{0.5}	Altura (z) m	Wt kg	Wt - Wo/Ao kg/m ²
0	0.000		0.9748	0.0000
298.8	17.286		0.9772	0.2864
601.2	24.519		0.9783	0.4176
900	30.000		0.9795	0.5608
1800	42.426		0.9810	0.7398
3600	60.000		0.9827	0.9426
7200	84.853		0.9846	1.1693
10800	103.923		0.9867	1.4199
14400	120.000		0.9878	1.5511
21600	146.969		0.9895	1.7540
86400	293.939		0.9982	2.7920
172800	415.692		1.0044	3.5318
259200	509.117		1.0075	3.9017
345600	587.878		1.0089	4.0687
432000	657.267		1.0096	4.1522
518400	720.000	0.0495	1.0102	4.2238
604800	777.689	0.0495	1.0102	4.2238

$$a/c = 0.45$$

$$H = 0.0495 \text{ m}$$

$$W_o = 0.9748 \text{ kg}$$

$$A = 0.008381 \text{ m}^2$$



Resultados obtenidos de la Grafica 2.

$$k = 0.0141 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{seg}^{1/2}}$$

$$t_n = 88804 \text{ seg}$$

$$m = 3.62\text{E}+07 \frac{\text{seg}}{\text{m}^2}$$

$$\varepsilon_e = 8.485 \%$$

$$S = 1.66\text{E}-04 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2}$$

Gráfica A.2. Cambio de peso de la probeta por unidad de área, en intervalos de tiempo del Ensayo 2 con una relación $a/c = 0.45$.

Ensayo 3. Para un concreto con una relación agua/cemento = 0.45

Tabla A.3. Datos del ensayo 3 de la prueba de absorción capilar.

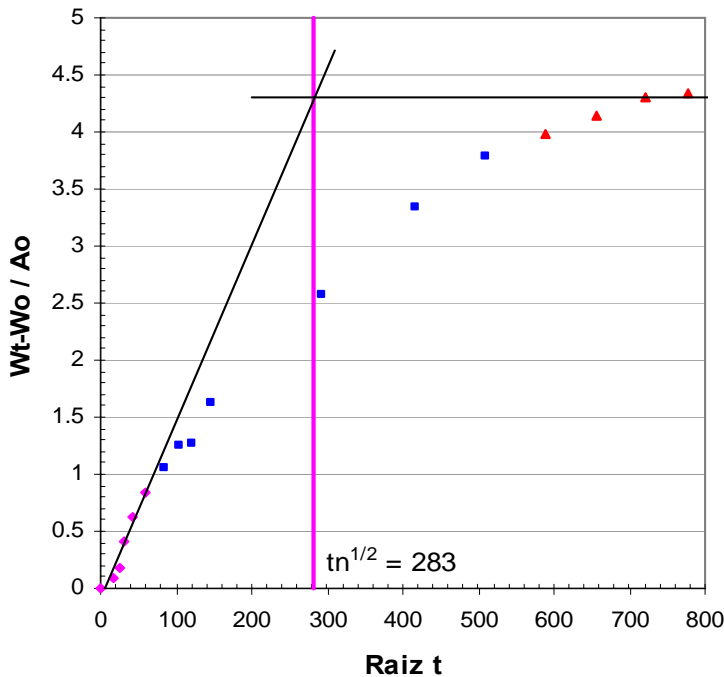
Tiempo seg	Raíz cuadrada (seg) ^{0.5}	Altura (z) m	Wt kg	Wt -Wo/Ao kg/m ²
0	0.000		0.9727	0.000
298.8	17.286		0.9734	0.083
601.2	24.519		0.9742	0.179
900	30.000		0.9762	0.417
1800	42.426		0.978	0.631
3600	60.000		0.9798	0.846
7200	84.853		0.9815	1.048
10800	103.923		0.9832	1.250
14400	120.000		0.9834	1.274
21600	146.969		0.9864	1.632
86400	293.939		0.9943	2.572
172800	415.692		1.0008	3.346
259200	509.117		1.0045	3.787
345600	587.878		1.0061	3.978
432000	657.267		1.0075	4.144
518400	720.000	0.0491	1.0089	4.311
604800	777.689	0.0491	1.0091	4.335

$a/c = 0.45$

$H = 0.0491 \text{ m}$

$W_o = 0.9727 \text{ kg}$

$A = 0.008397 \text{ m}^2$



Resultados obtenidos de la Grafica 3.

$k = 0.0152 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{seg}^{1/2}}$

$t_n = 80089 \text{ seg}$

$m = 3.32\text{E}+07 \frac{\text{seg}}{\text{m}^2}$

$\epsilon_e = 8.758 \%$

$S = 1.73\text{E}-04 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2}$

Gráfica A.3. Cambio de peso de la probeta por unidad de área, en intervalos de tiempo del Ensayo 3 con una relación a/c = 0.45.

Ensayo 4. Para un concreto con una relación agua/cemento = 0.65

Tabla A.4. Datos del ensayo 4 de la prueba de absorción capilar.

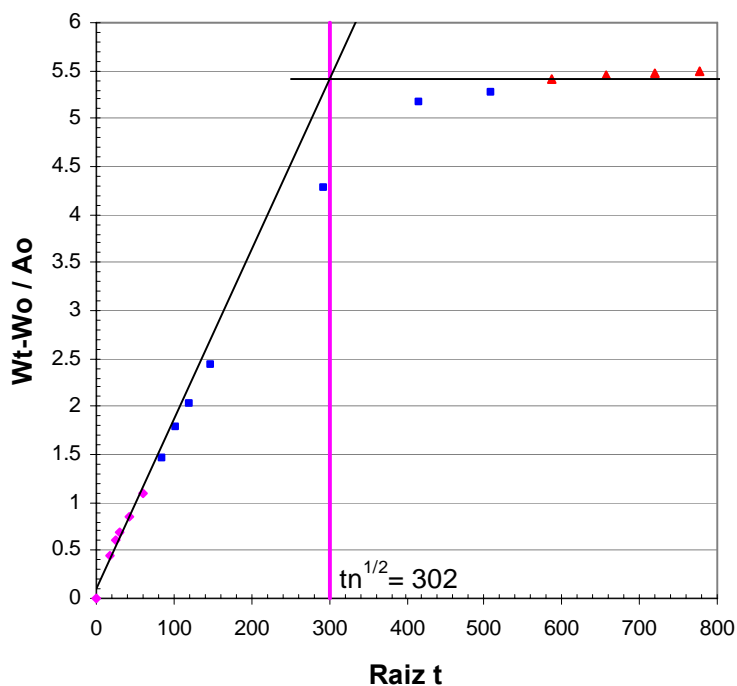
Tiempo seg	Raíz cuadrada (seg) ^{0.5}	Altura (z) m	Wt kg	Wt -Wo/Ao kg/m ²
0	0.000		0.9409	0.000
298.8	17.286		0.9447	0.454
601.2	24.519		0.9460	0.610
900	30.000		0.9466	0.681
1800	42.426		0.9481	0.861
3600	60.000		0.9500	1.088
7200	84.853		0.9531	1.458
10800	103.923		0.9559	1.793
14400	120.000		0.9578	2.020
21600	146.969		0.9612	2.427
86400	293.939		0.9767	4.280
172800	415.692		0.9841	5.164
259200	509.117		0.9850	5.272
345600	587.878	0.049	0.9862	5.415
432000	657.267	0.049	0.9865	5.451
518400	720.000	0.049	0.9867	5.475
604800	777.689	0.049	0.9868	5.487

$$a/c = 0.65$$

$$H = 0.049 \text{ m}$$

$$W_o = 0.9409 \text{ kg}$$

$$A = 0.008365 \text{ m}^2$$



Resultados obtenidos de la Grafica 4.

$$k = 0.0179 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{seg}^{1/2}}$$

$$t_n = 91204 \text{ seg}$$

$$m = 3.80\text{E}+07 \frac{\text{seg}}{\text{m}^2}$$

$$\epsilon_e = 11.061 \%$$

$$S = 1.62\text{E}-04 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2}$$

Gráfica A.4. Cambio de peso de la probeta por unidad de área, en intervalos de tiempo del Ensayo 4 con una relación a/c = 0.65.

Ensayo 5. Para un concreto con una relación agua/cemento = 0.65

Tabla A.5. Datos del ensayo 5 de la prueba de absorción capilar.

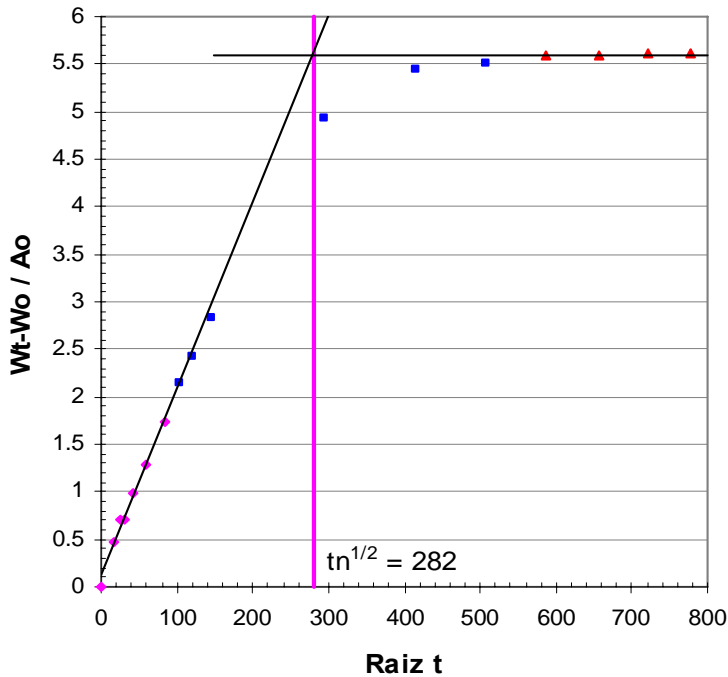
Tiempo seg	Raíz cuadrada (seg) ^{0.5}	Altura (z) m	Wt kg	Wt -Wo/Ao kg/m ²
0	0.000		0.9492	0.000
298.8	17.286		0.9532	0.478
601.2	24.519		0.9552	0.717
900	30.000		0.9552	0.717
1800	42.426		0.9575	0.992
3600	60.000		0.9599	1.279
7200	84.853		0.9637	1.733
10800	103.923		0.9672	2.152
14400	120.000		0.9694	2.415
21600	146.969		0.9728	2.821
86400	293.939		0.9905	4.937
172800	415.692		0.9947	5.439
259200	509.117		0.9953	5.511
345600	587.878	0.0483	0.9960	5.595
432000	657.267	0.0483	0.9960	5.595
518400	720.000	0.0483	0.9962	5.619
604800	777.689	0.0483	0.9962	5.619

$a/c = 0.65$

$H = 0.0483 \text{ m}$

$W_o = 0.9492 \text{ kg}$

$A = 0.008365 \text{ m}^2$



Resultados obtenidos de la Grafica 5.

$k = 0.0199 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{seg}^{1/2}}$

$t_n = 79524 \text{ seg}$

$m = 3.41\text{E}+07 \frac{\text{seg}}{\text{m}^2}$

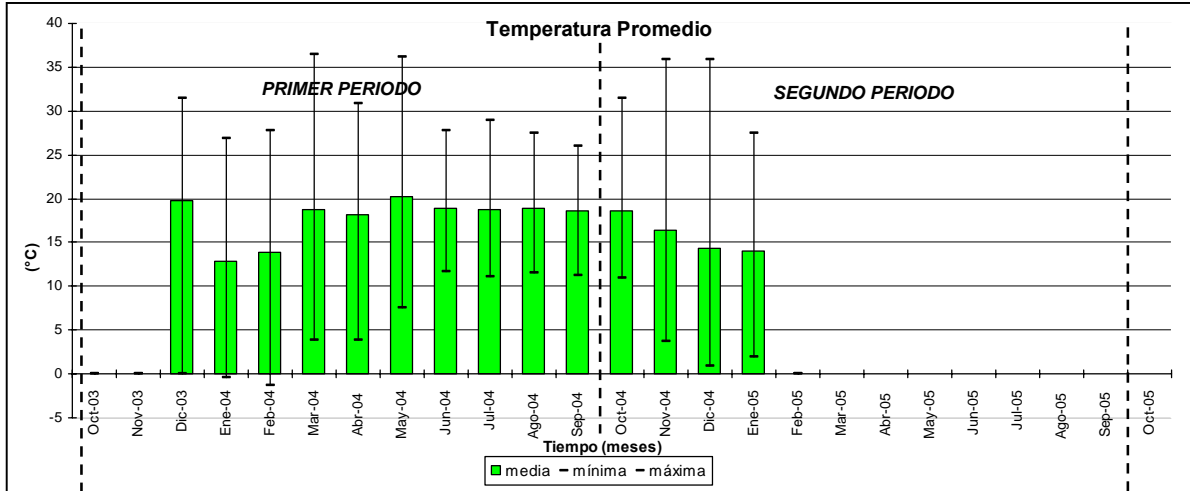
$\epsilon_e = 11.594 \%$

$S = 1.71\text{E}-04 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2}$

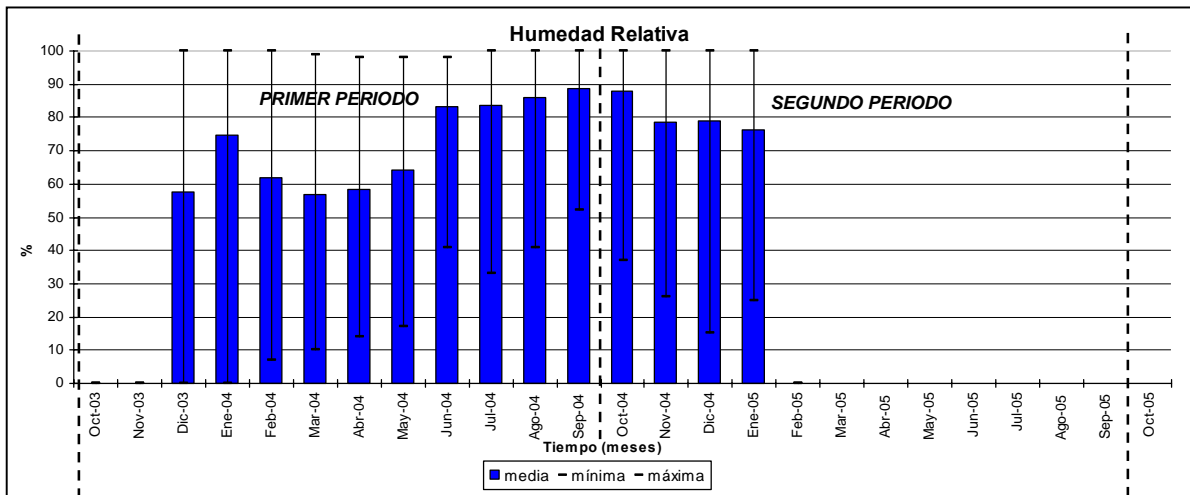
Gráfica A.5. Cambio de peso de la probeta por unidad de área, en intervalos de tiempo del Ensayo 5 con una relación a/c = 0.65.

ANEXO B

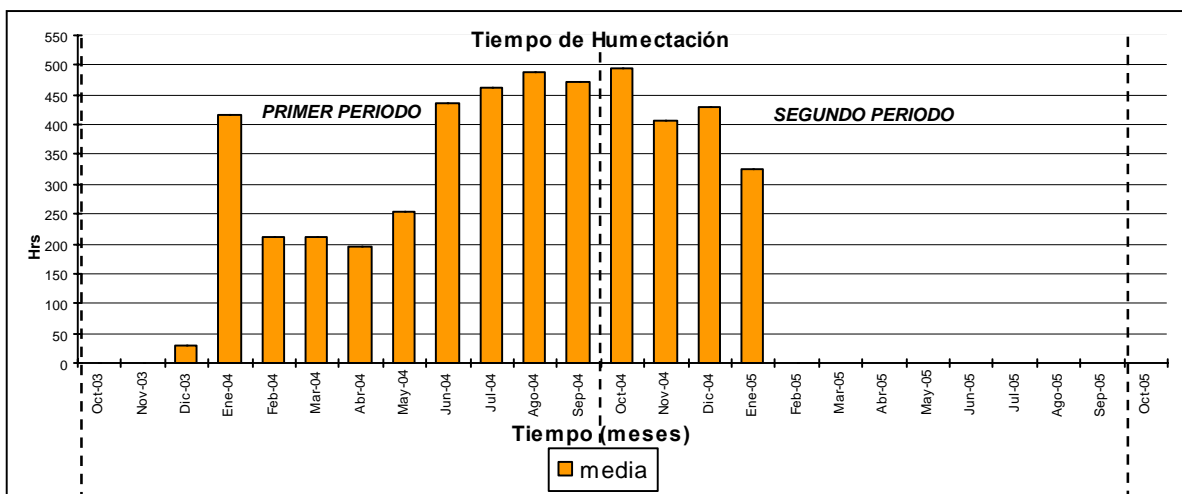
DATOS METEOROLOGICOS DE LA ESTACION DE MORELIA (Mx5)



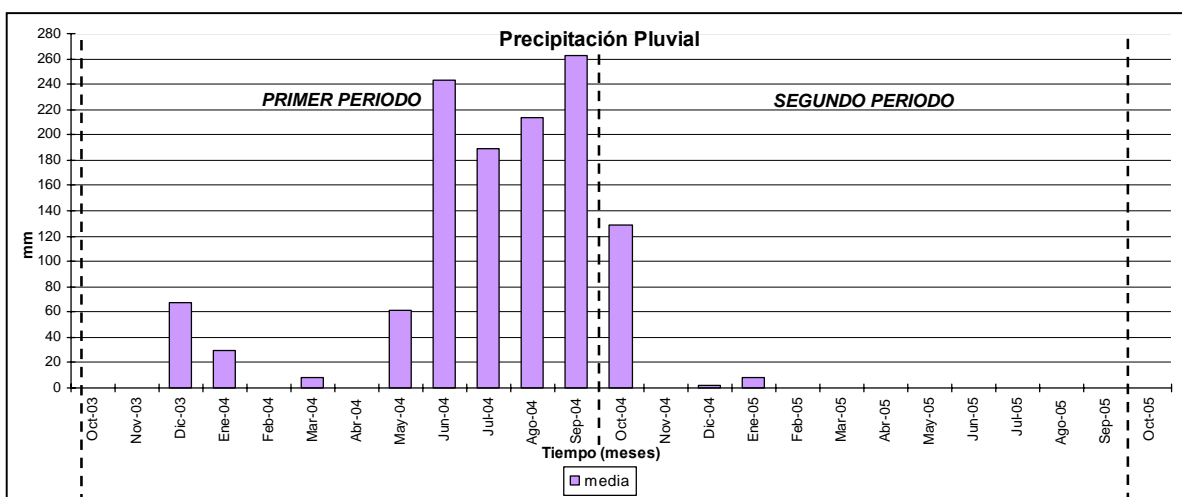
Gráfica B.1. Valores mensuales de la Temperatura Promedio de la Estación (Mx5) Morelia.



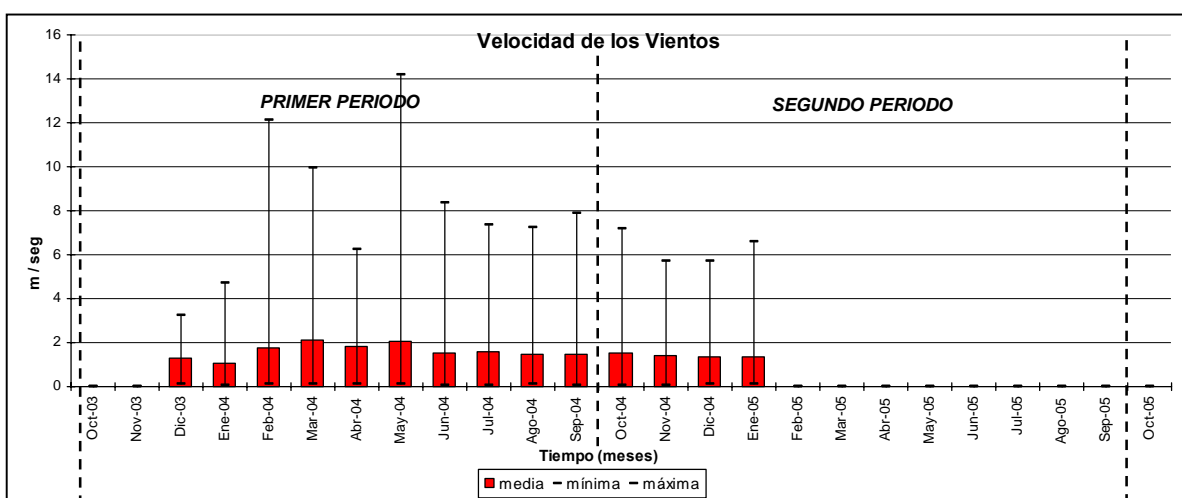
Gráfica B.2. Valores mensuales promedio de la Humedad Relativa de la Estación (Mx5) Morelia.



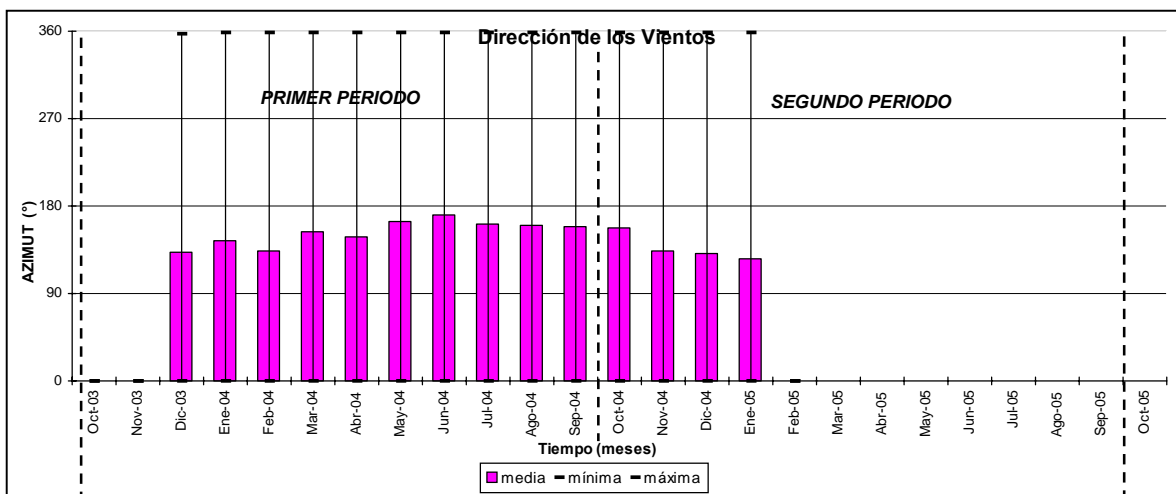
Gráfica B.3. Valores mensuales de Tiempo de Humectación de la Estación (Mx5) Morelia.



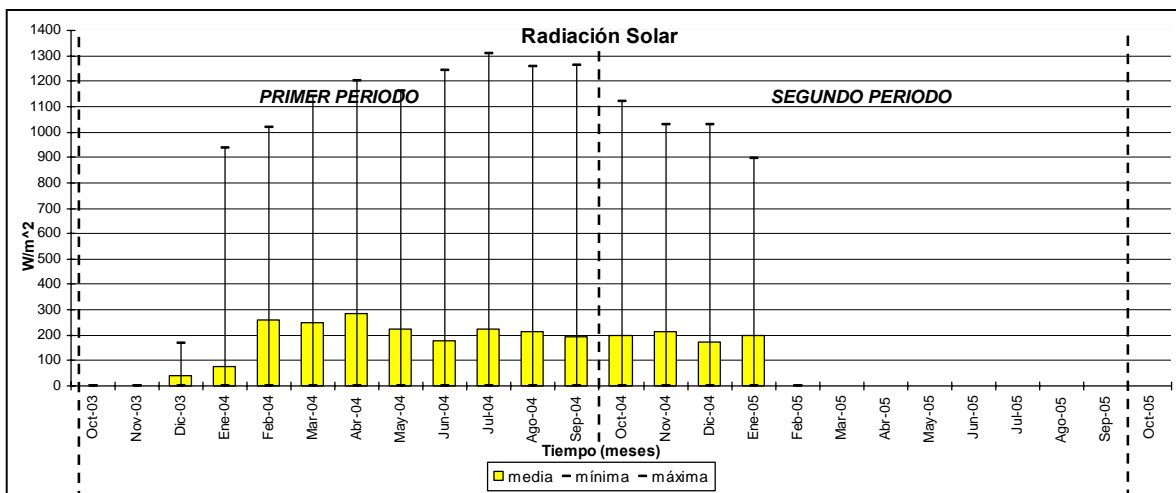
Gráfica B.4. Sumatoria mensual de la Precipitación Pluvial de la Estación (Mx5) Morelia.



Gráfica B.5. Valores mensuales promedio de la Dirección de los Vientos de la Estación (Mx5).

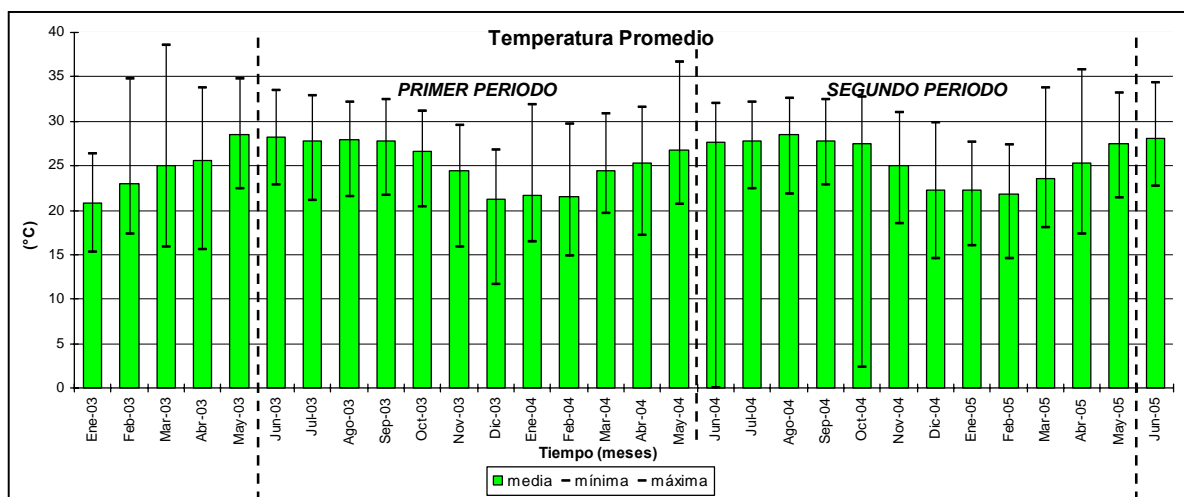


Gráfica B.6. Valores mensuales promedio de la Dirección de los Vientos de la Estación (Mx5) Morelia.

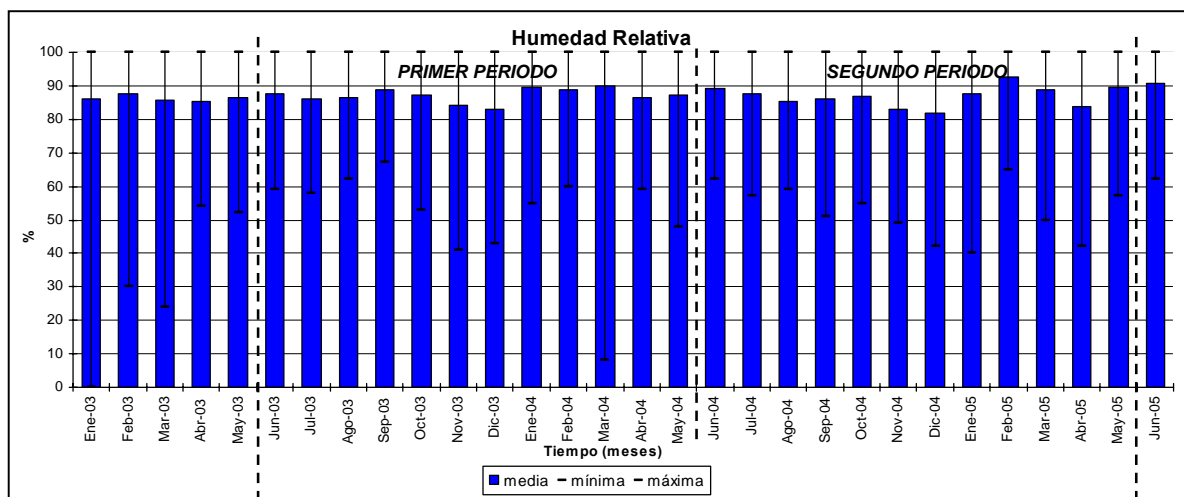


Gráfica B.7. Valores mensuales promedio de la Radiación Solar de la Estación (Mx5) Morelia.

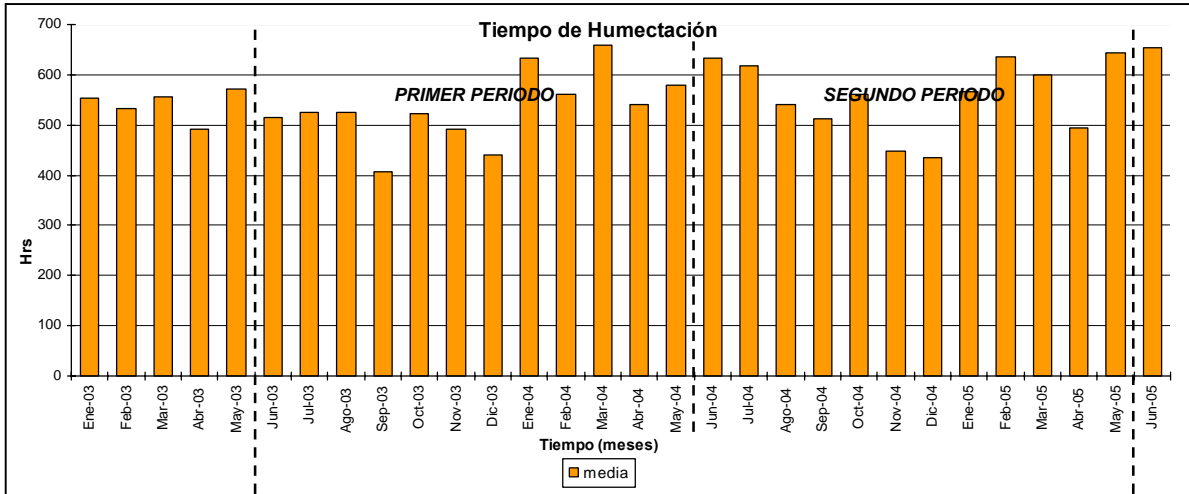
DATOS METEOROLOGICOS DE LA ESTACION DE VERACRUZ (Mx6)



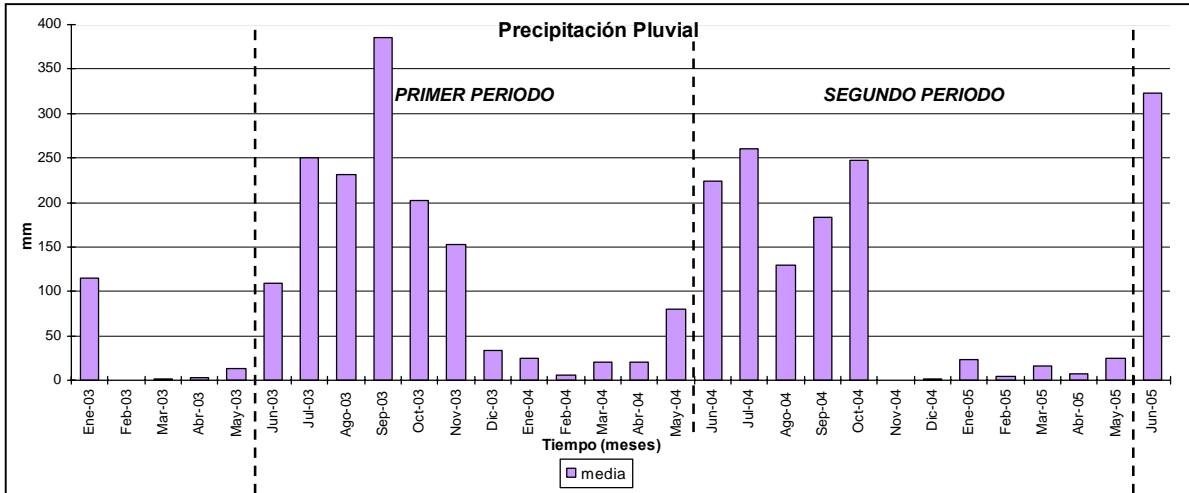
Gráfica B.8. Valores mensuales de la Temperatura Promedio de la Estación (Mx6) Veracruz.



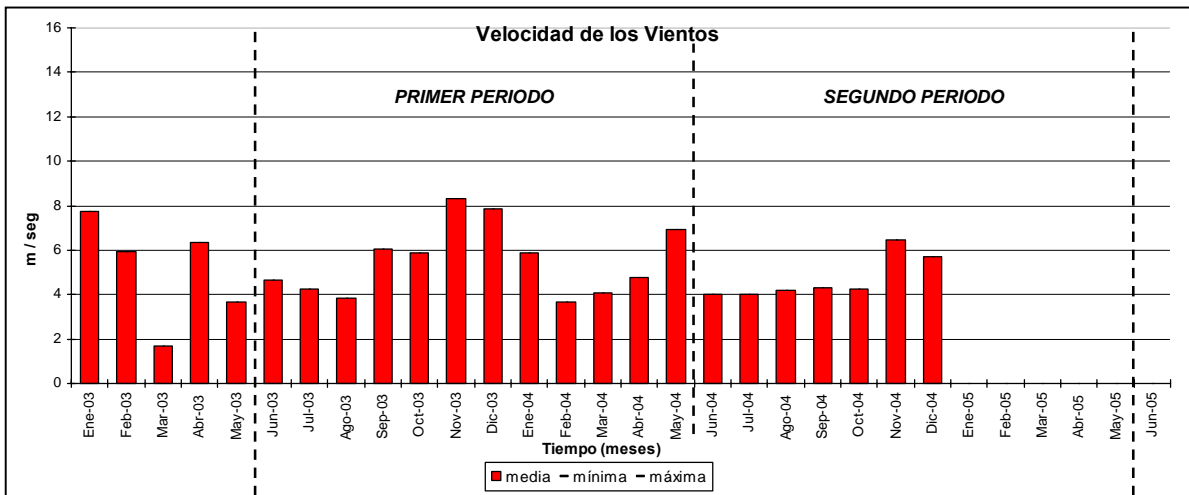
Gráfica B.9. Valores mensuales promedio de la Humedad Relativa de la Estación (Mx6) Veracruz.



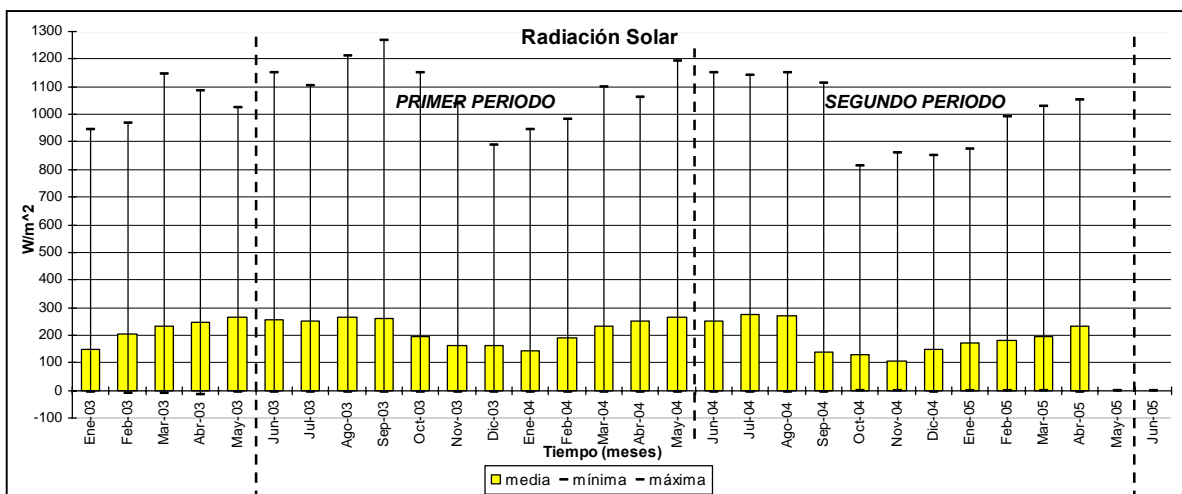
Gráfica B.10. Valores mensuales de Tiempo de Humectación de la Estación (Mx6) Veracruz.



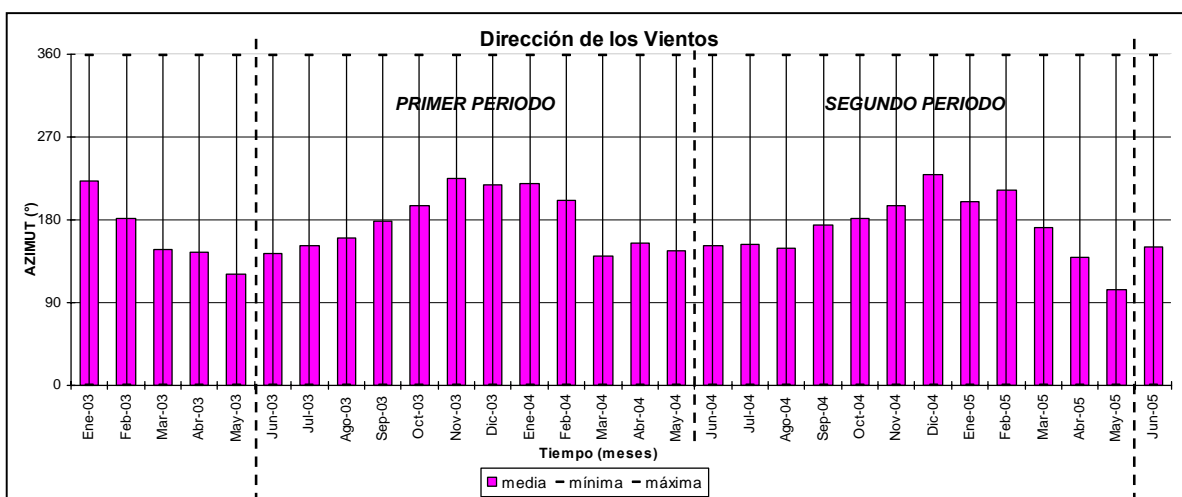
Gráfica B.11. Sumatoria mensual de la Precipitación Pluvial de la Estación (Mx6) Veracruz.



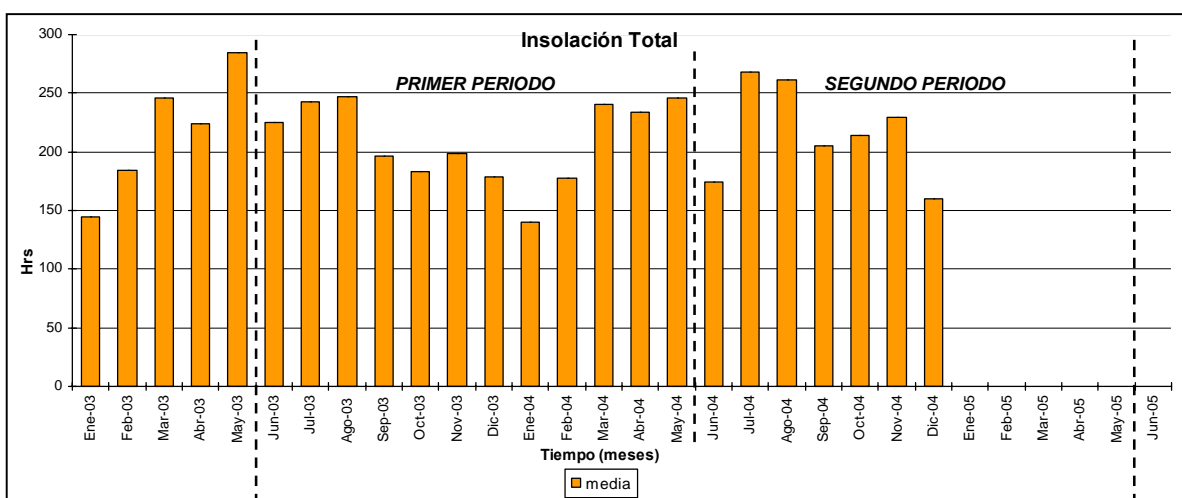
Gráfica B.13. Valores mensuales promedio de la Velocidad de los Vientos de la Estación (Mx6).



Gráfica B.14. Valores mensuales promedio de la Radiación Solar de la Estación (Mx6) Veracruz.

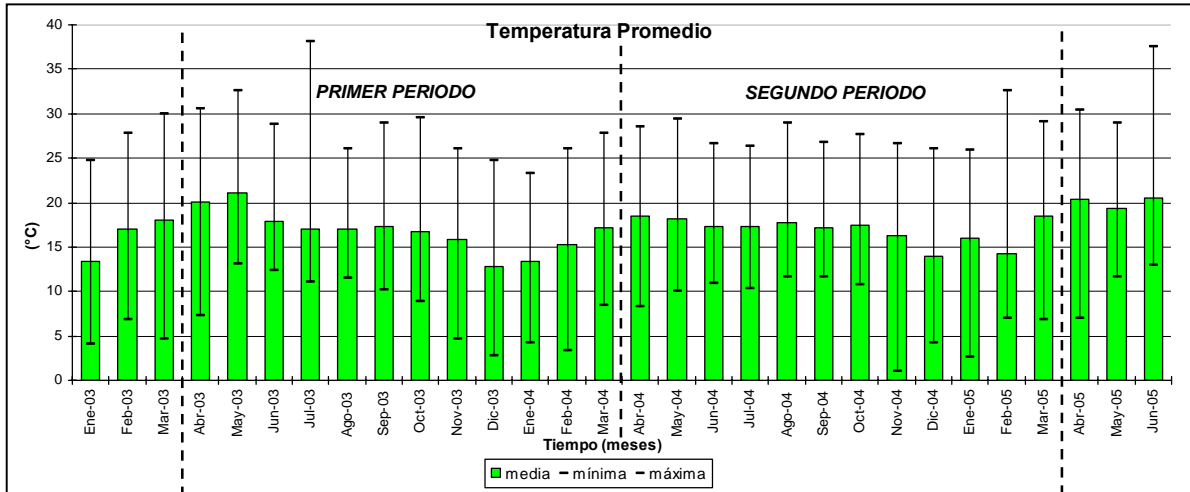


Gráfica B.15. Valores mensuales promedio de la Dirección de los Vientos de la Estación (Mx6).

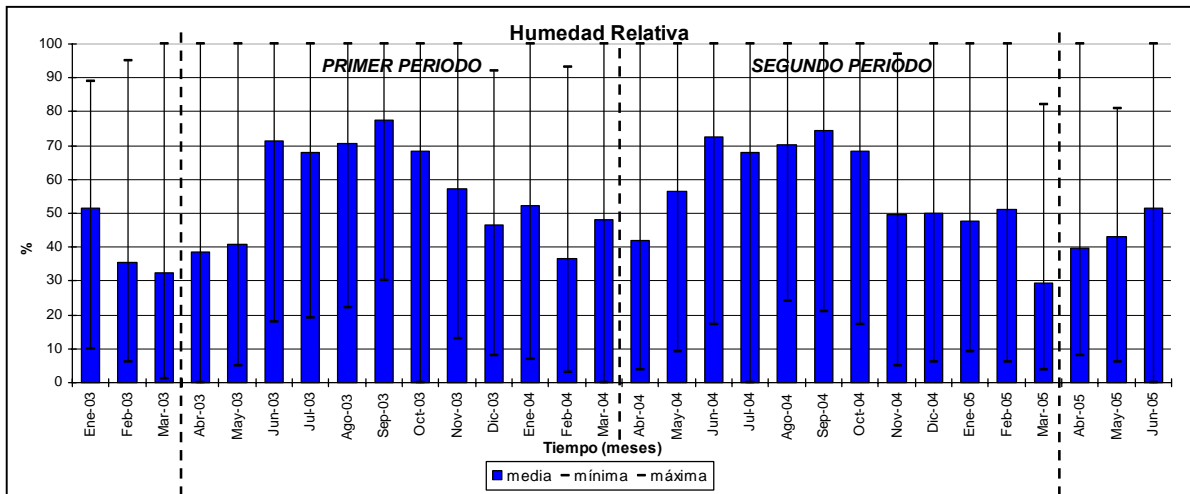


Gráfica B.16. Valores de Horas de Insolación Total mensual de la Estación (Mx6) Veracruz.

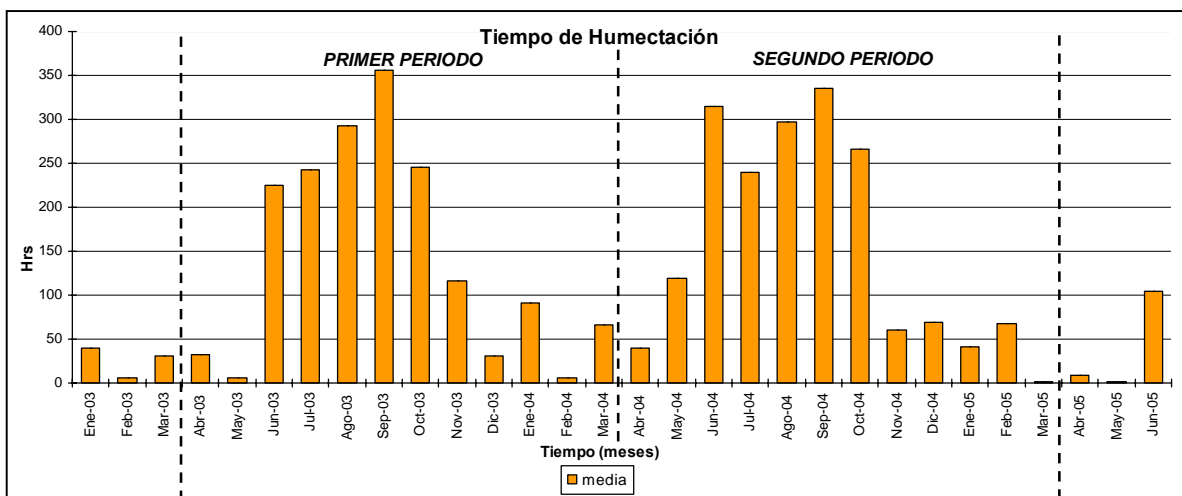
DATOS METEOROLOGICOS DE LA ESTACION DE MEXICO, D.F. (Mx7)



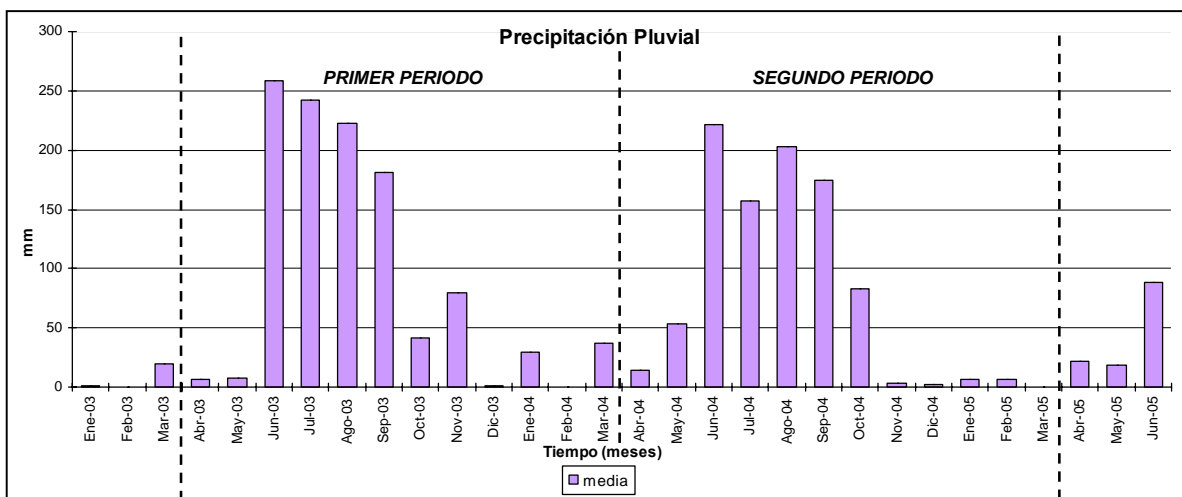
Gráfica B.17. Valores mensuales de la Temperatura Promedio de la Estación (Mx7) México, D.F.



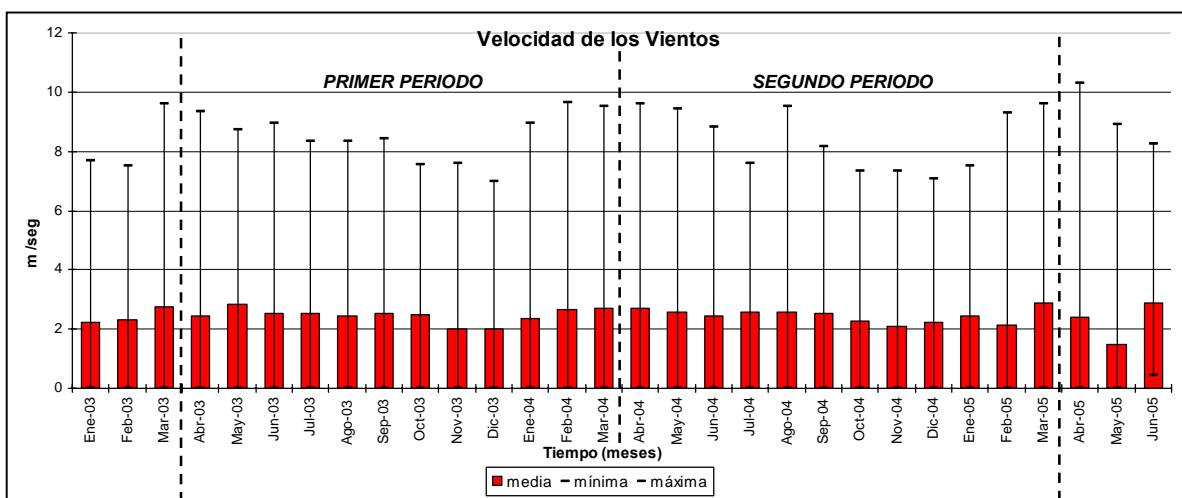
Gráfica B.18. Valores mensuales promedio de la Humedad Relativa de la Estación (Mx7) México, D.F.



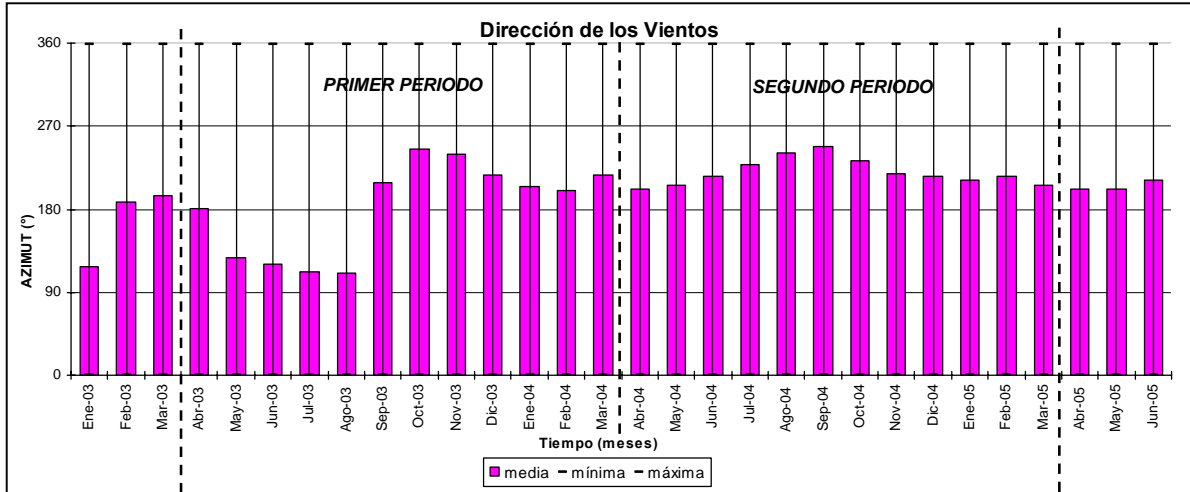
Gráfica B.19. Valores mensuales de Tiempo de Humectación de la Estación (Mx7) México, D.F.



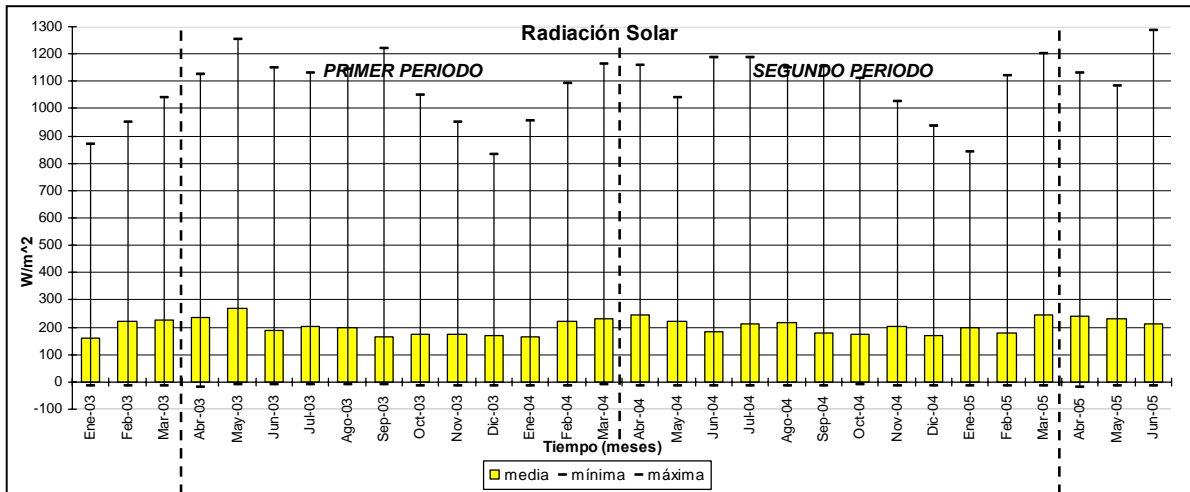
Gráfica B.20. Sumatoria mensual de la Precipitación Pluvial de la Estación (Mx7) México, D.F.



Gráfica B.21. Valores mensuales promedio de la Velocidad de los Vientos de la Estación (Mx7).

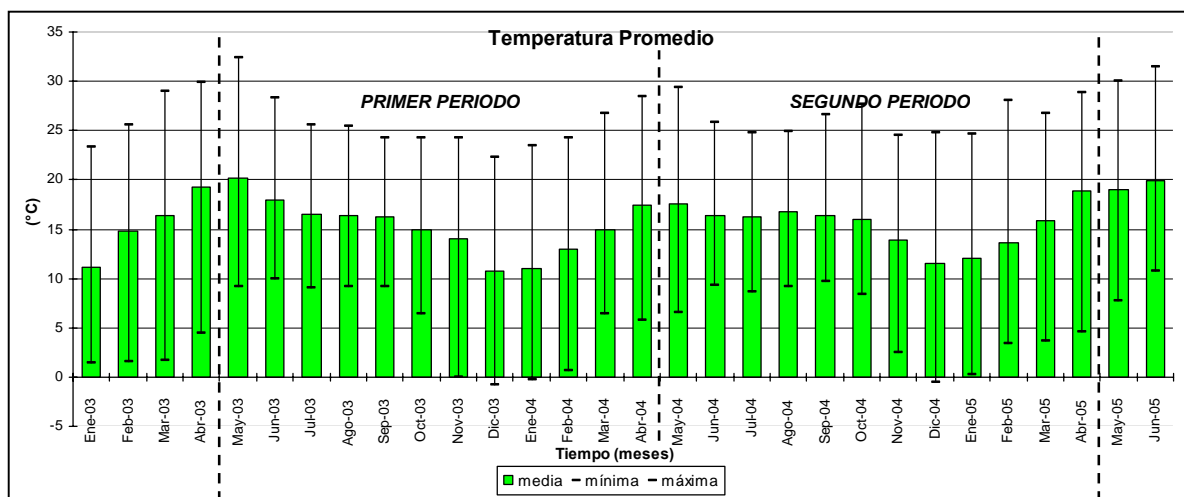


Gráfica B.22. Valores mensuales promedio de la Dirección de los Vientos de la Estación (Mx7) México, D.F.

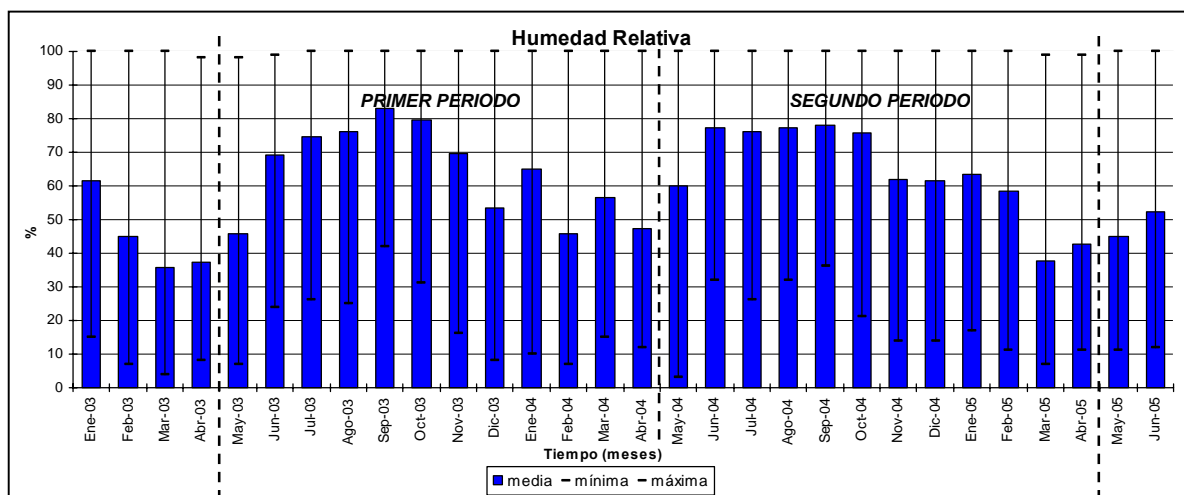


Gráfica B.23. Valores mensuales promedio de la Radiación Solar de la Estación (Mx7) México, D.F.

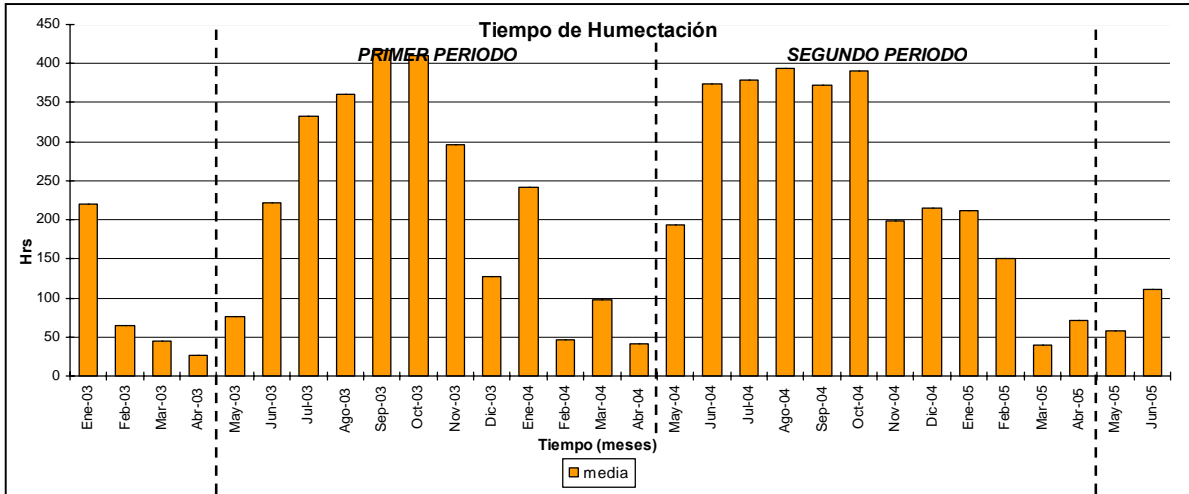
DATOS METEOROLOGICOS DE LA ESTACION DE QUERETARO (Mx8)



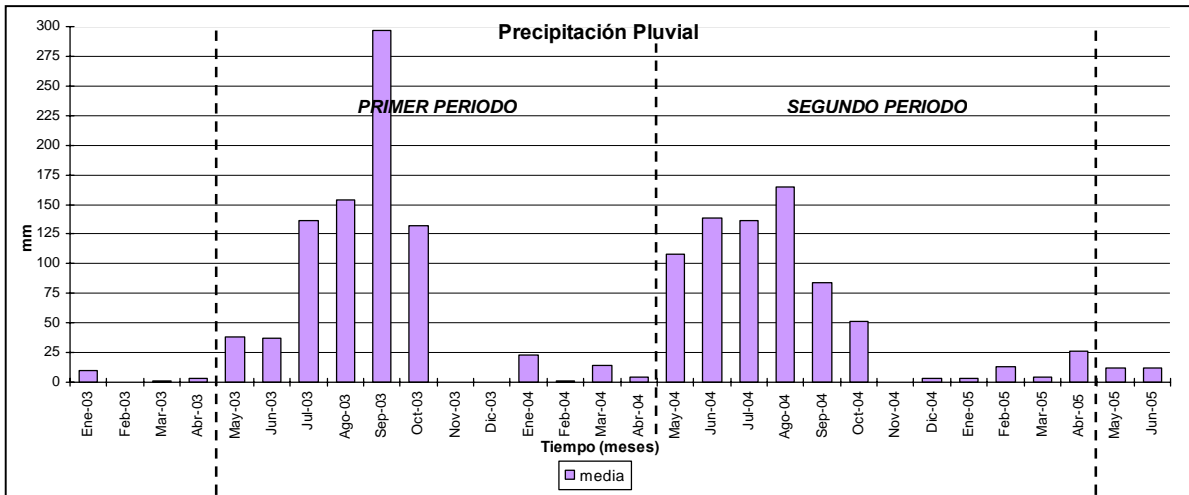
Gráfica B.24. Valores mensuales de la Temperatura Promedio de la Estación (Mx8) Querétaro.



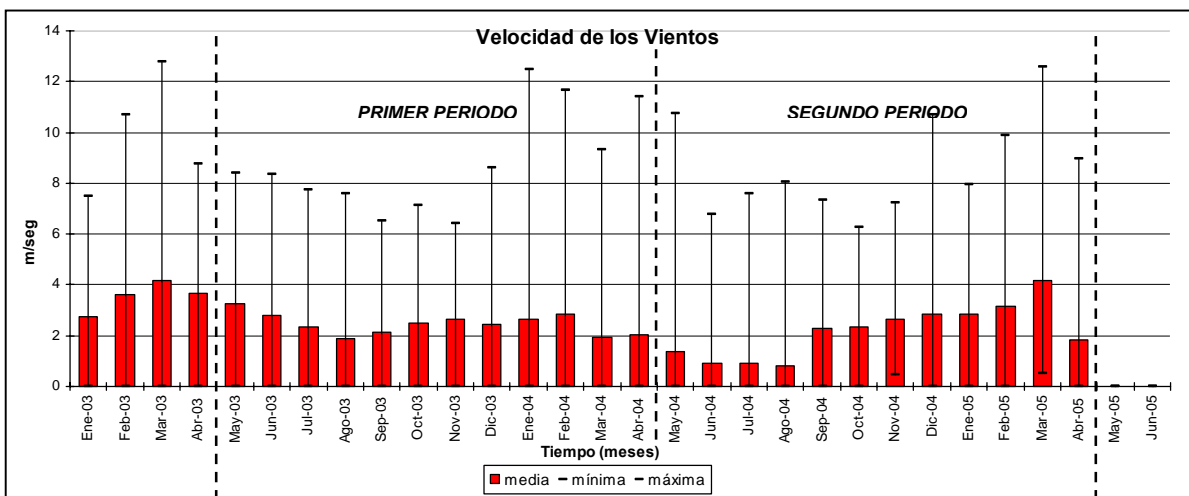
Gráfica B.25. Valores mensuales promedio de la Humedad Relativa de la Estación (Mx8) Querétaro.



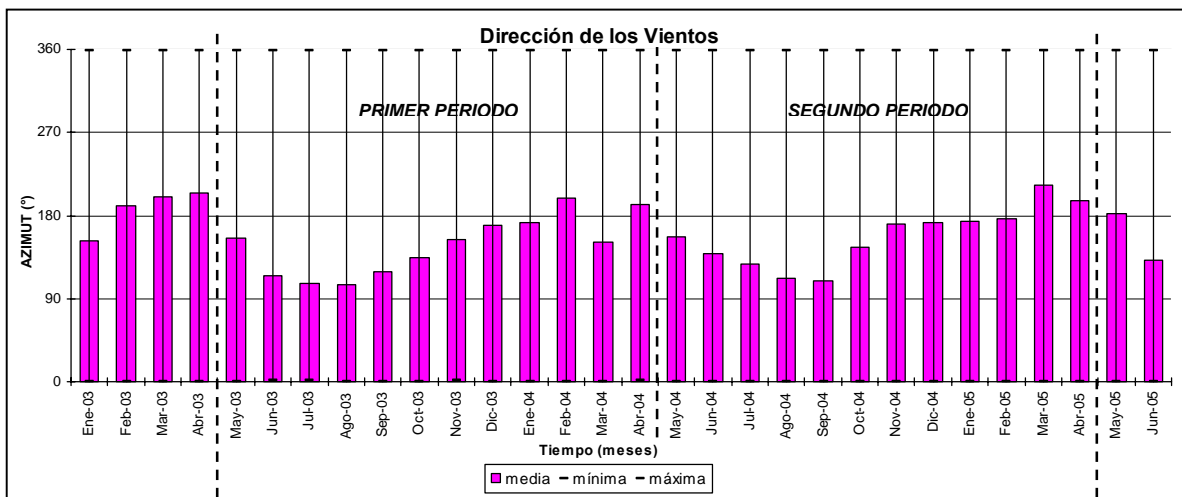
Gráfica B.26. Valores mensuales de Tiempo de Humectación de la Estación (Mx8) Querétaro.



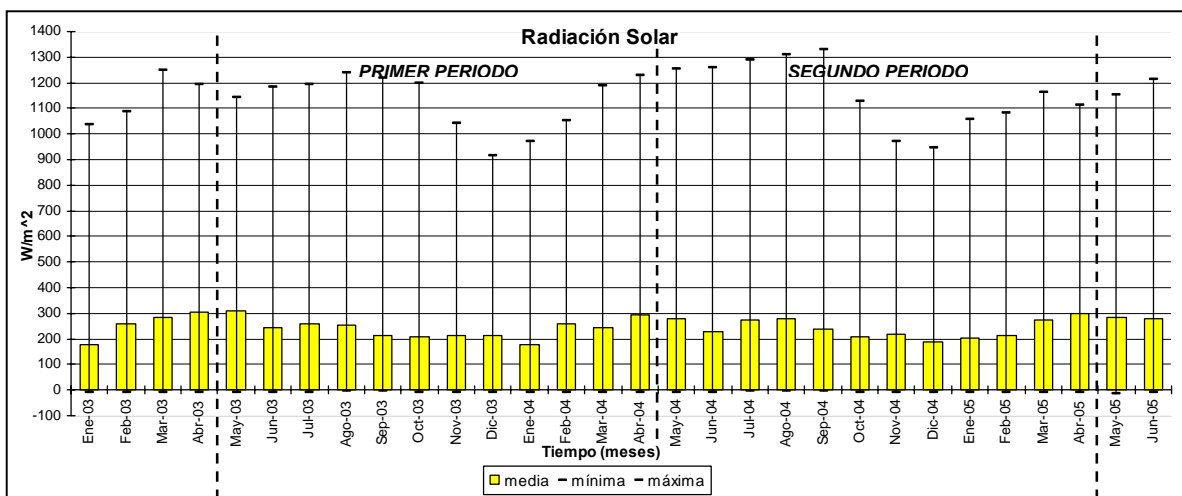
Gráfica B.27. Sumatoria mensual de la Precipitación Pluvial de la Estación (Mx8) Querétaro.



Gráfica B.28. Valores mensuales promedio de la Velocidad de los Vientos de la Estación (Mx8).

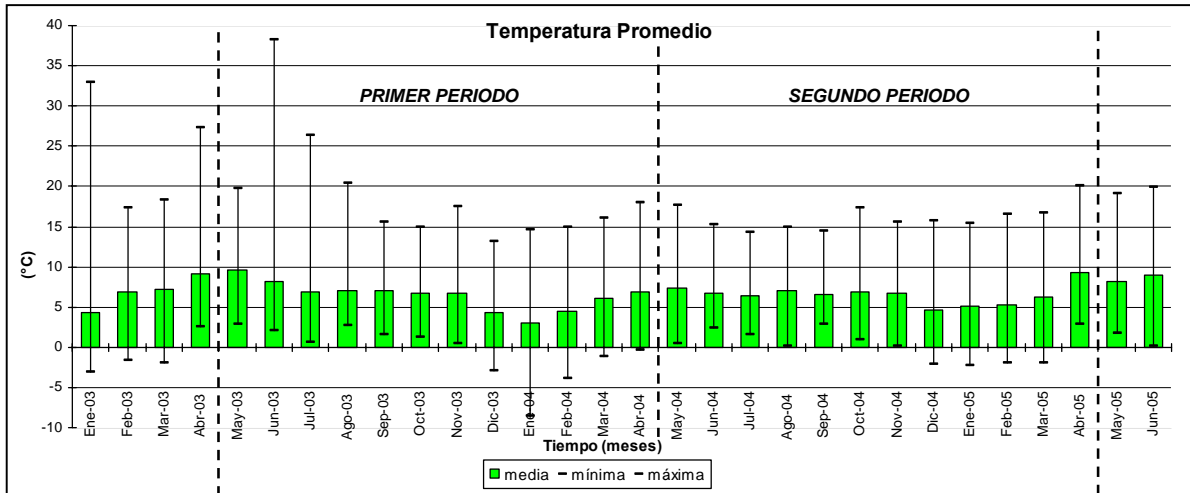


Gráfica B.30. Valores mensuales promedio de la Dirección de los Vientos de la Estación (Mx8) Querétaro.

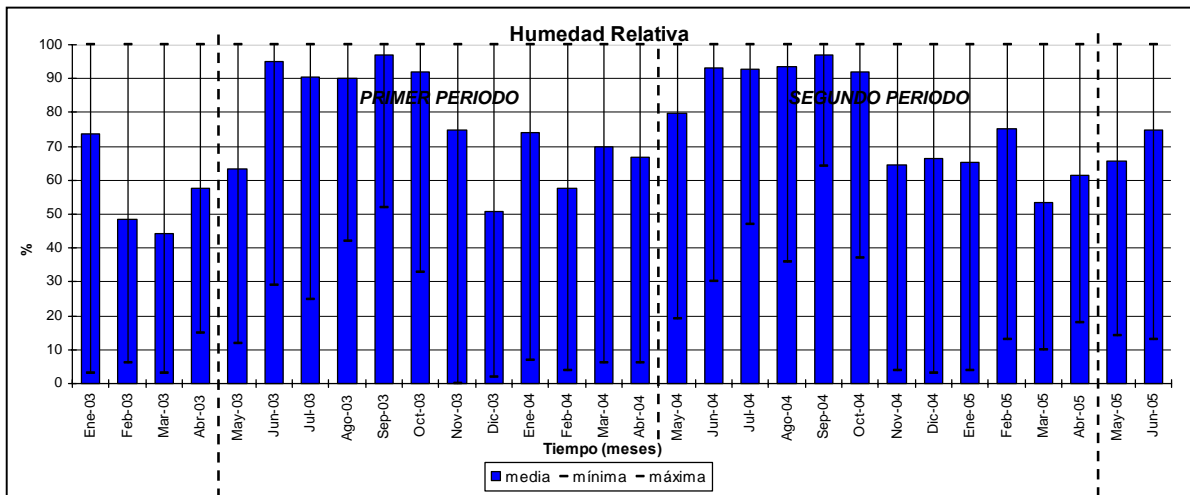


Gráfica B.31. Valores mensuales promedio de la Radiación Solar de la Estación (Mx8) Querétaro.

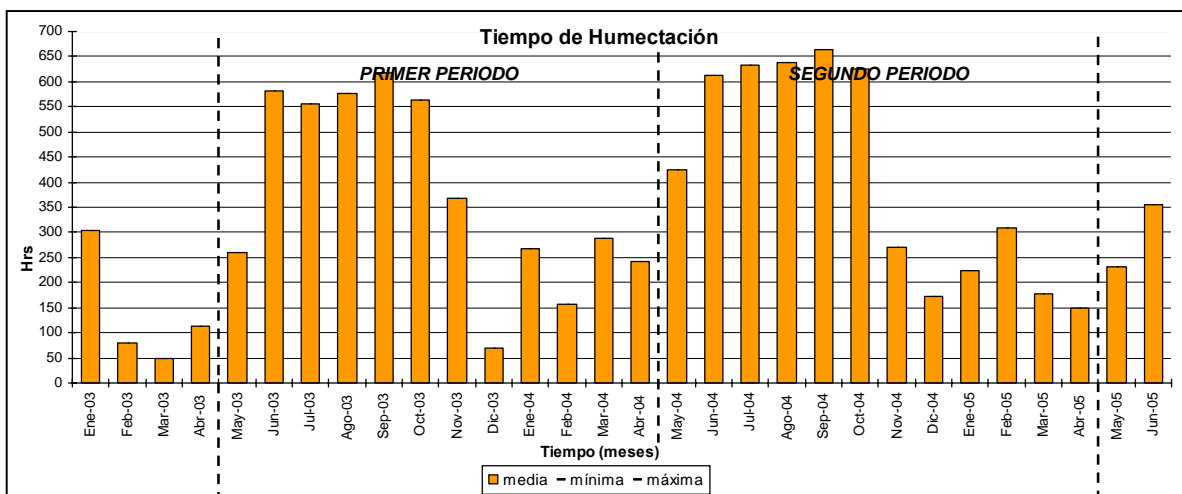
DATOS METEOROLOGICOS DE LA ESTACION DE TOLUCA (Mx9)



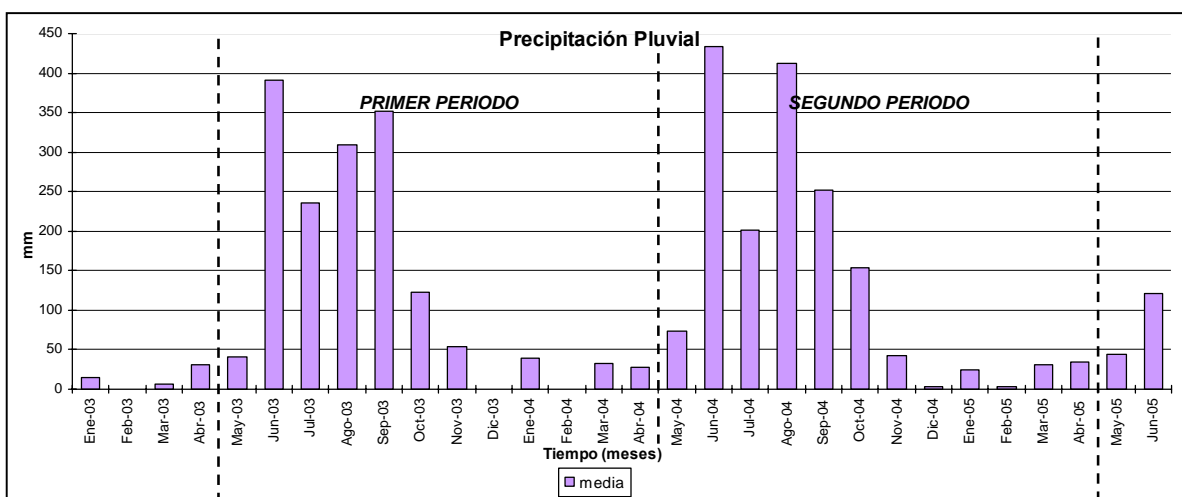
Gráfica B.32. Valores mensuales de la Temperatura Promedio de la Estación (Mx9) Toluca.



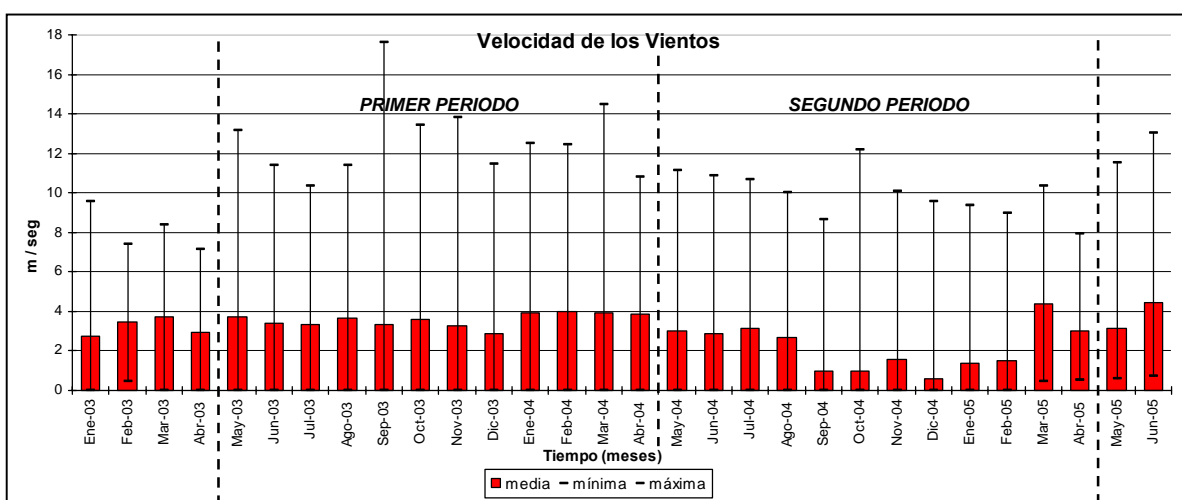
Gráfica B.33. Valores mensuales promedio de la Humedad Relativa de la Estación (Mx9) Toluca.



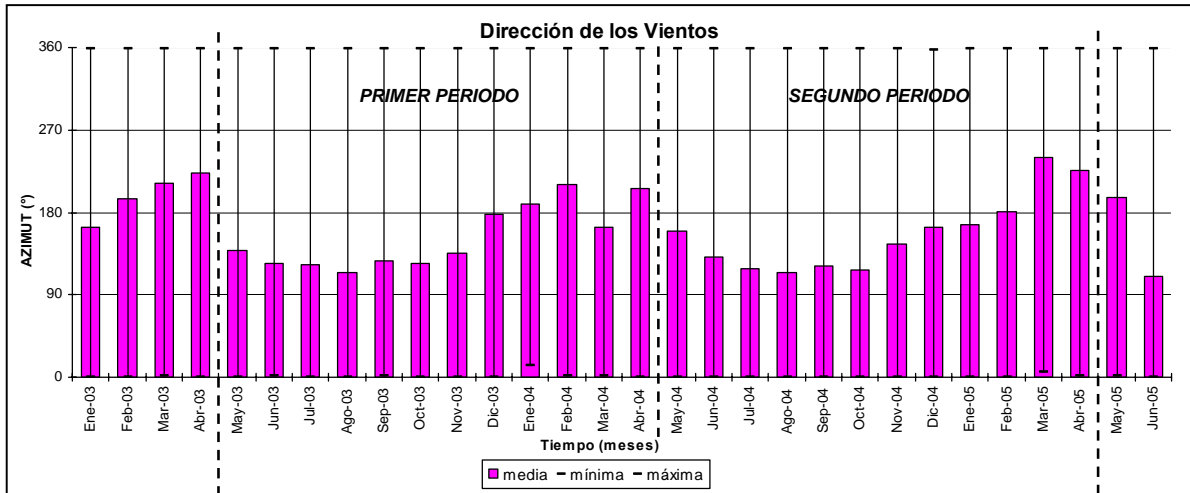
Gráfica B.34. Valores mensuales de Tiempo de Humectación de la Estación (Mx9) Toluca.



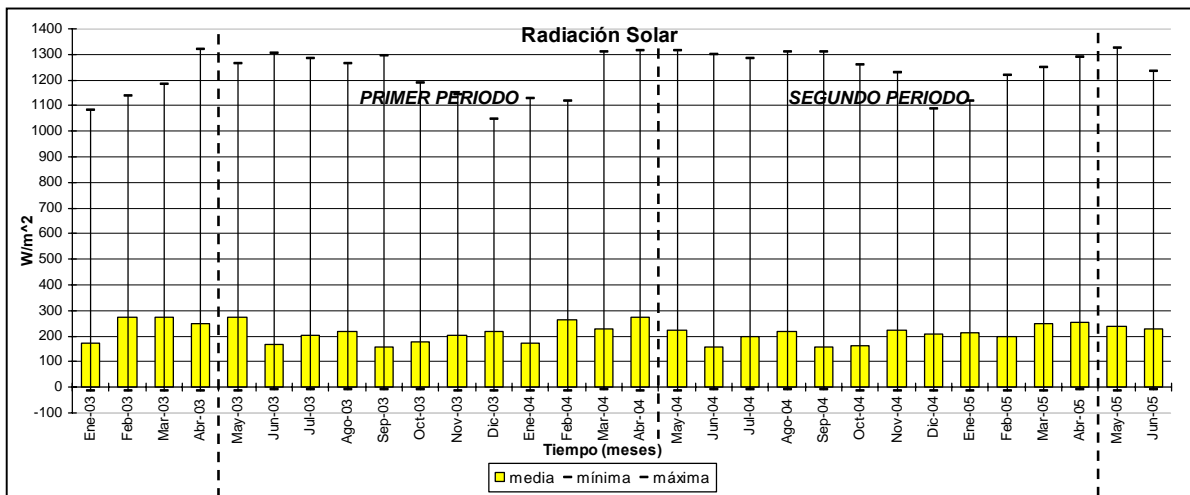
Gráfica B.35. Sumatoria mensual de la Precipitación Pluvial de la Estación (Mx9) Toluca.



Gráfica B.36. Valores mensuales promedio de la Velocidad de los Vientos de la Estación (Mx9) .

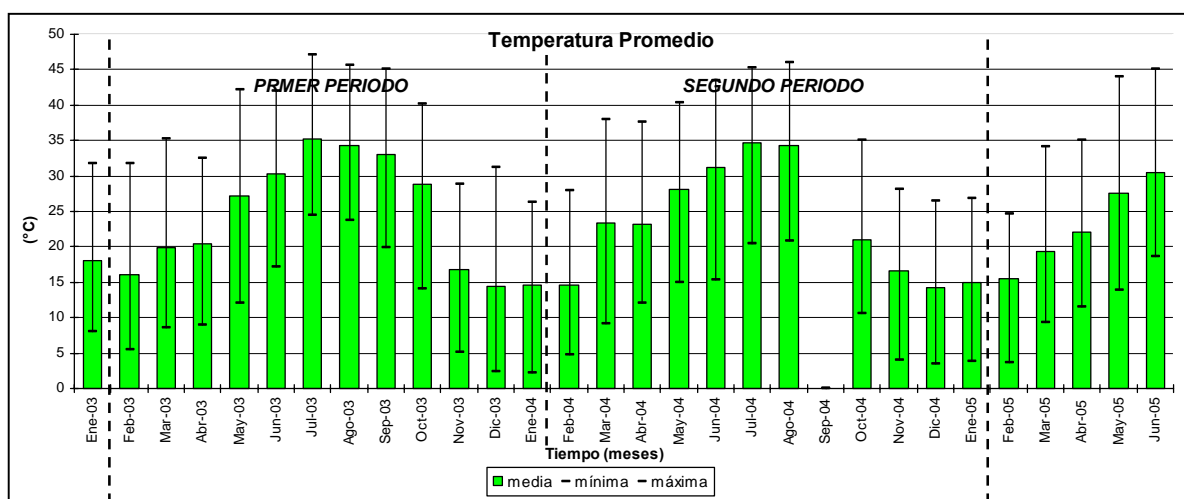


Gráfica B.37. Valores mensuales promedio de la Dirección de los Vientos de la Estación (Mx9) Toluca.

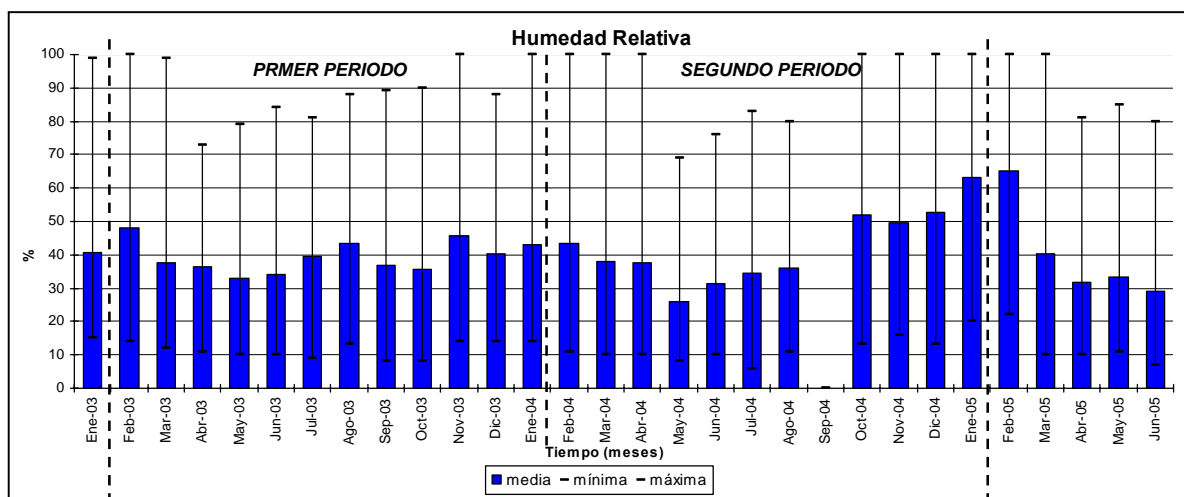


Gráfica B.38. Valores mensuales promedio de la Radiación Solar de la Estación (Mx9) Toluca.

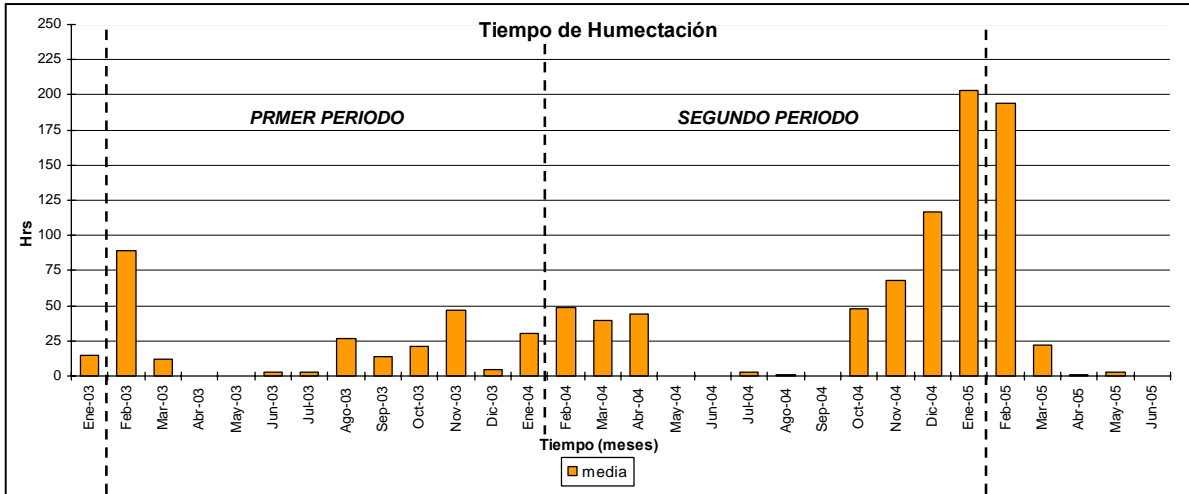
DATOS METEOROLOGICOS DE LA ESTACION DE MEXICALI (Mx10)



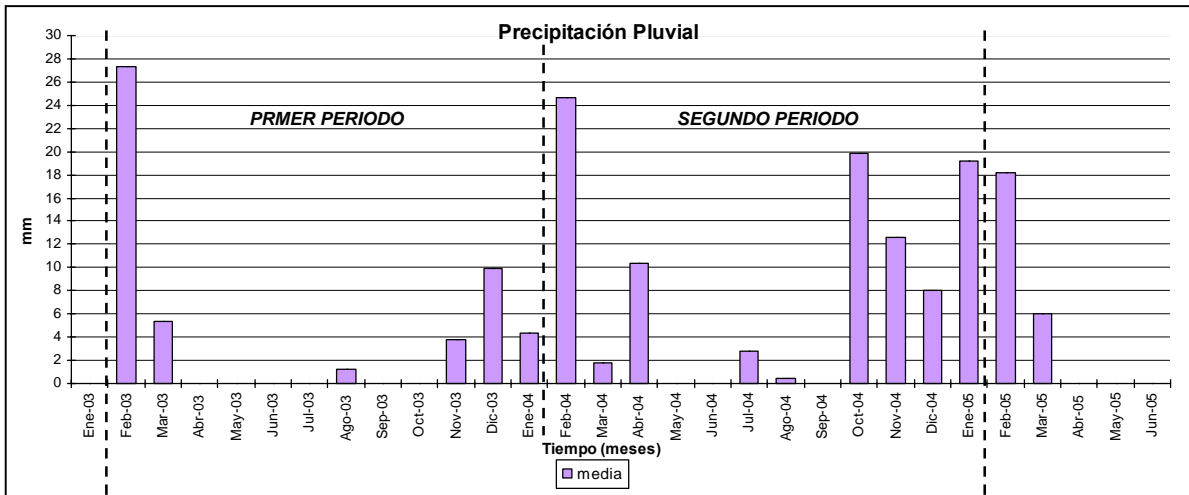
Gráfica B.39. Valores mensuales de la Temperatura Promedio de la Estación (Mx10) Mexicali.



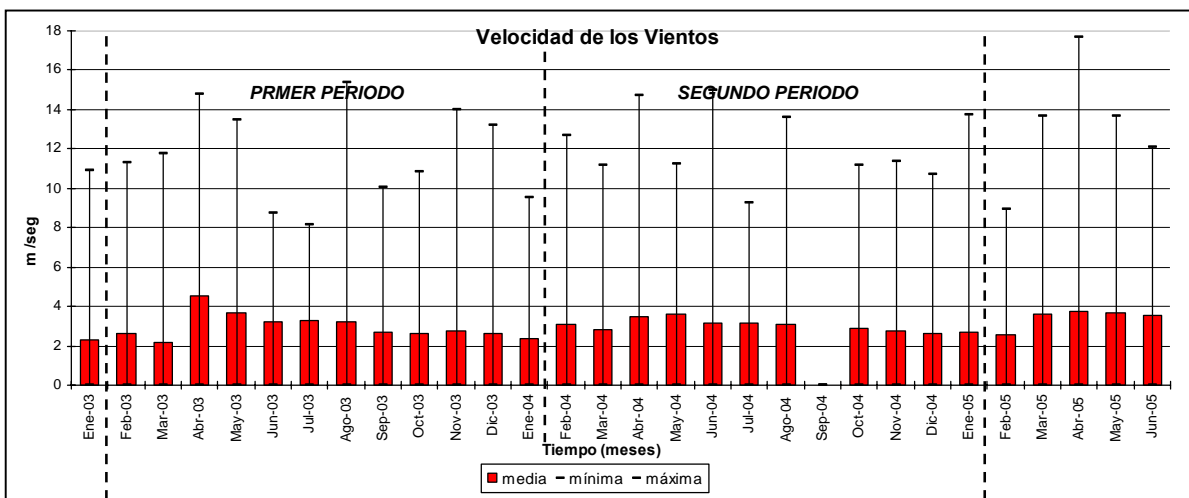
Gráfica B.40. Valores mensuales promedio de la Humedad Relativa de la Estación (Mx10) Mexicali.



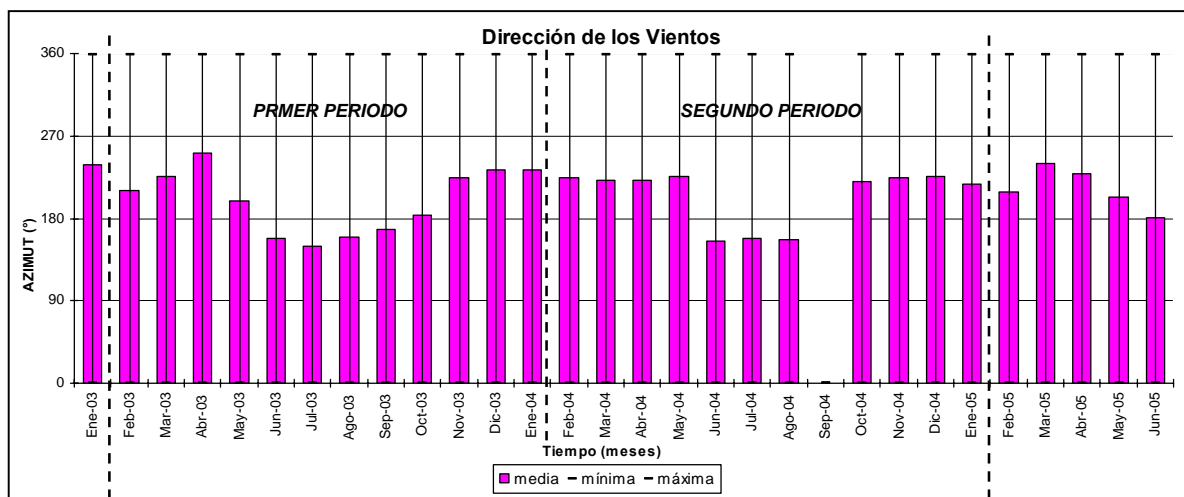
Gráfica B.41. Valores mensuales de Tiempo de Humectación de la Estación (Mx10) Mexicali.



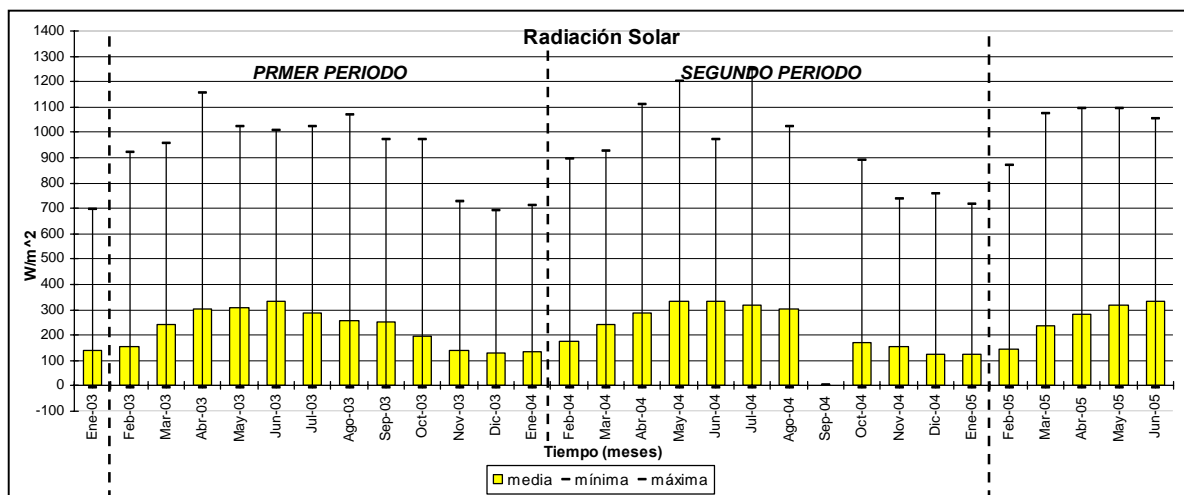
Gráfica B.42. Sumatoria mensual de la Precipitación Pluvial de la Estación (Mx10) Mexicali.



Gráfica B.43. Valores mensuales promedio de la Velocidad de los Vientos de la Estación (Mx10).



Gráfica B.44. Valores mensuales promedio de la Dirección de los Vientos de la Estación (Mx10) Mexicali.



Gráfica B.45. Valores mensuales promedio de la Radiación Solar de la Estación (Mx10) Mexicali.

ANEXO C

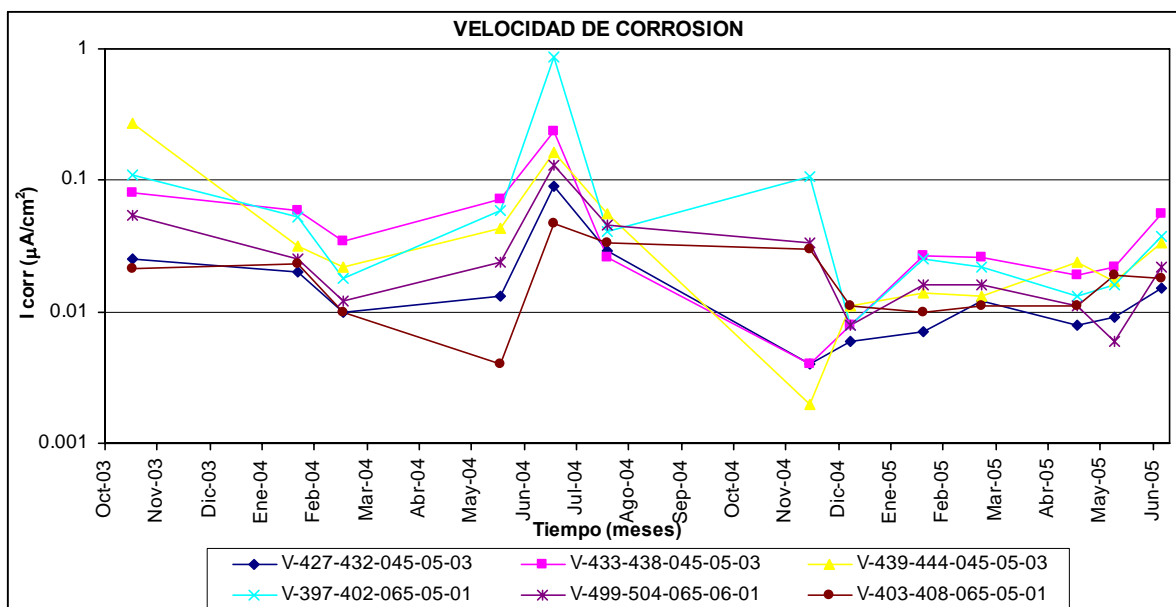
DATOS ELECTROQUIMICOS.

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} ($\mu A/cm^2$)]

Estación Morelia (Mx5)

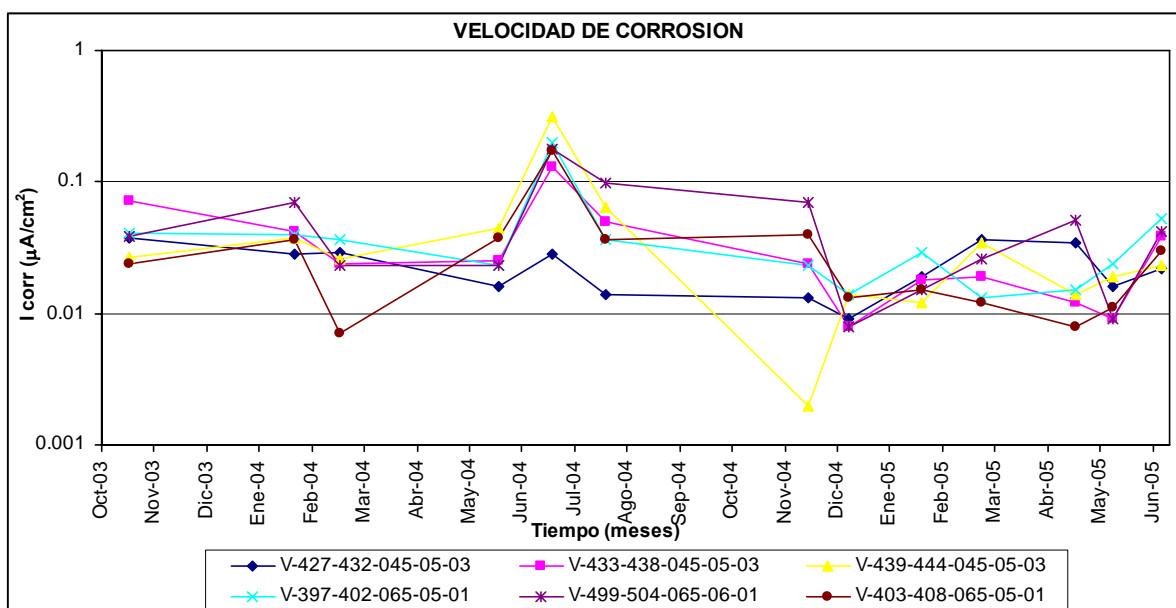
⇒ A 3.0 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 1. Velocidad de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx5) Morelia.

• **Cara Resguardada C2**



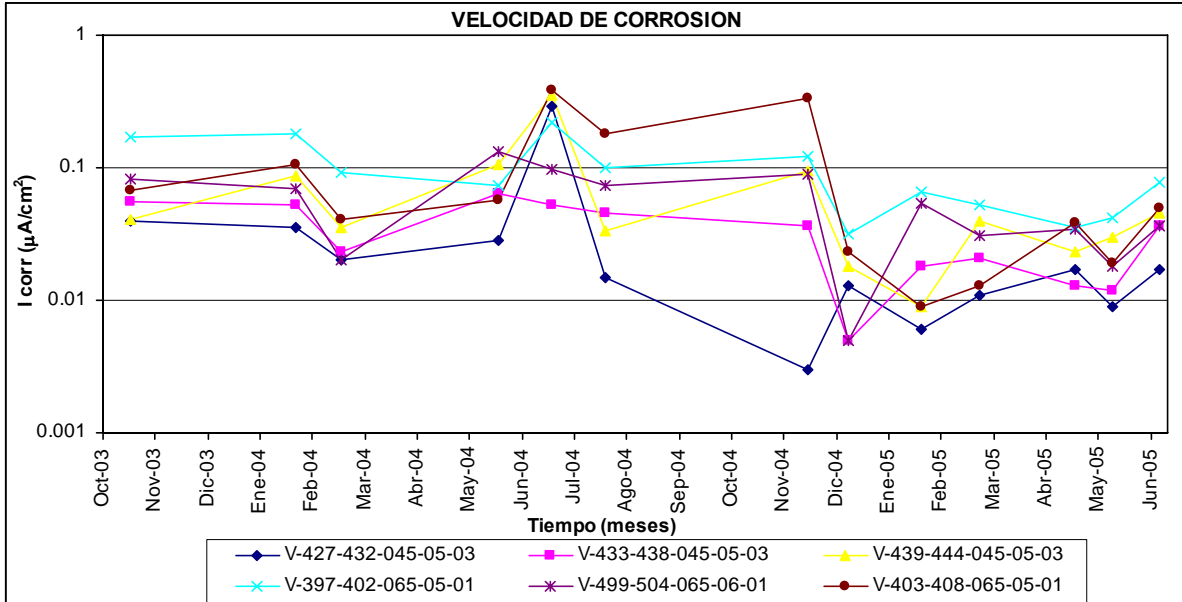
Gráfica. C. 2. Velocidad de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx5) Morelia.

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)]

Estación Morelia (Mx5)

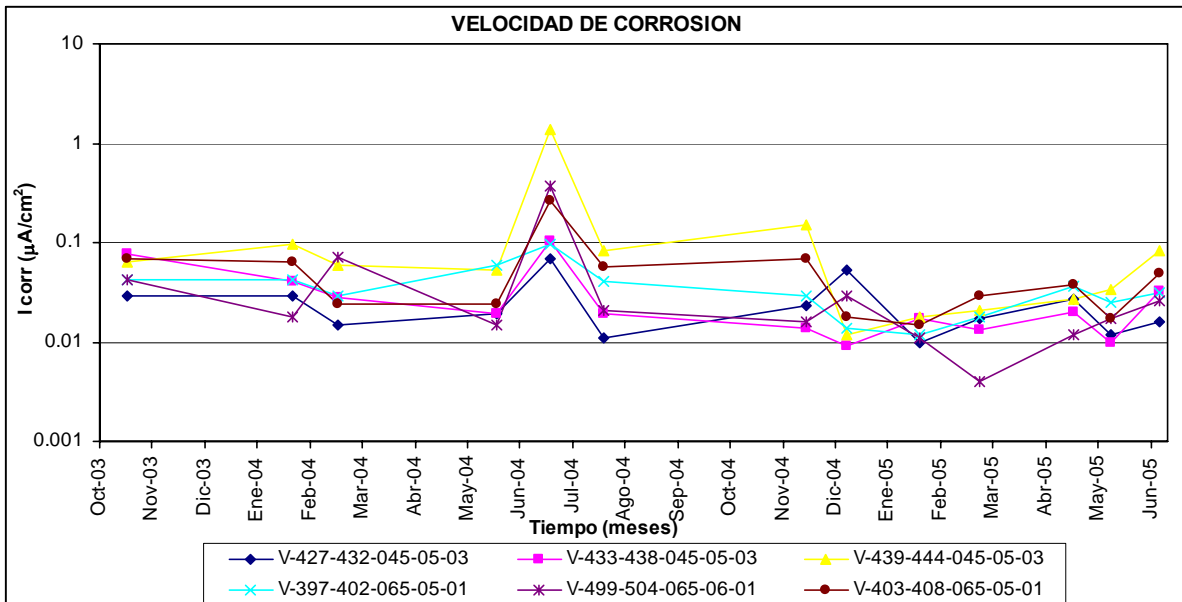
⇒ **A 2.0 cm de recubrimiento.**

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 3. Velocidad de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx5) Morelia.

• **Cara Resguardada C2**



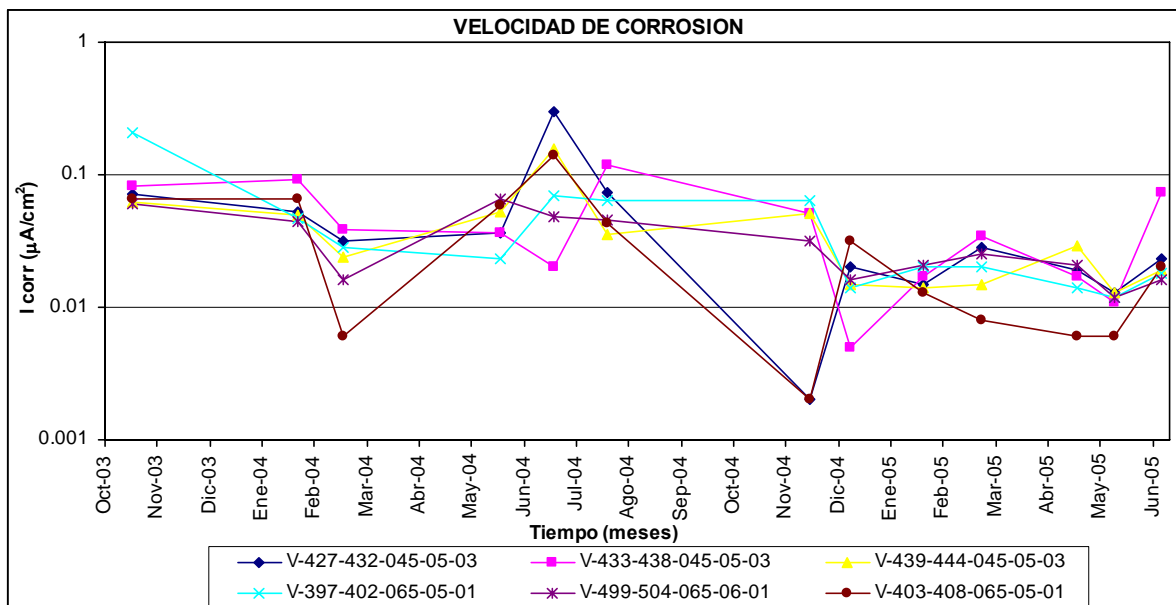
Gráfica. C. 4. Velocidad de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx5) Morelia.

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} (μA/cm²)]

Estación Morelia (Mx5)

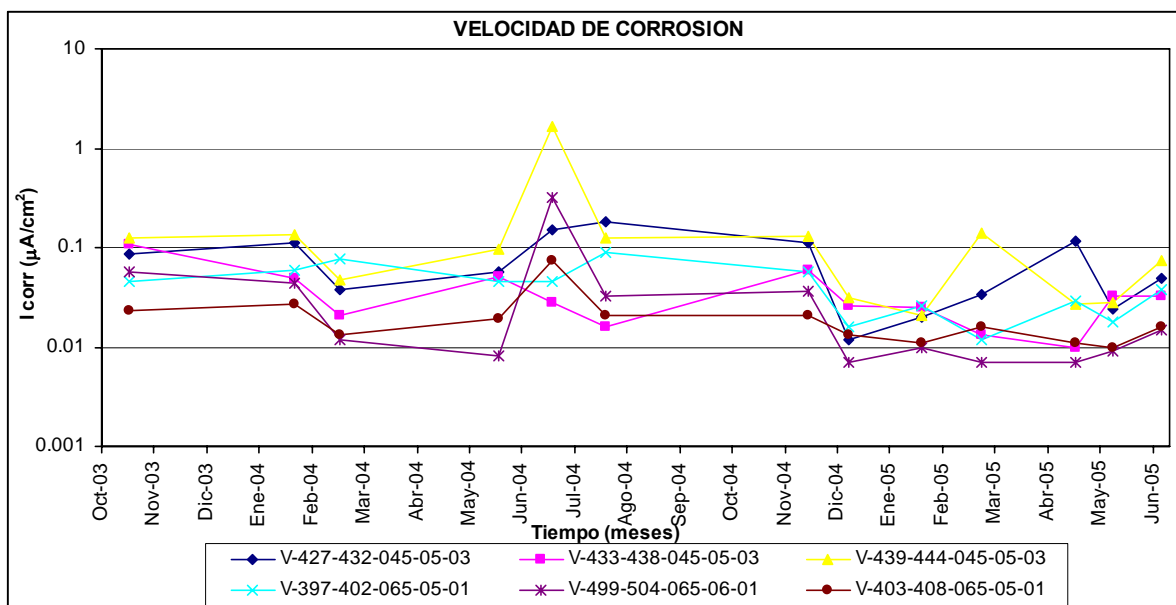
⇒ **A 1.5 cm de recubrimiento.**

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 5. Velocidad de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx5) Morelia.

• **Cara Resguardada C2**



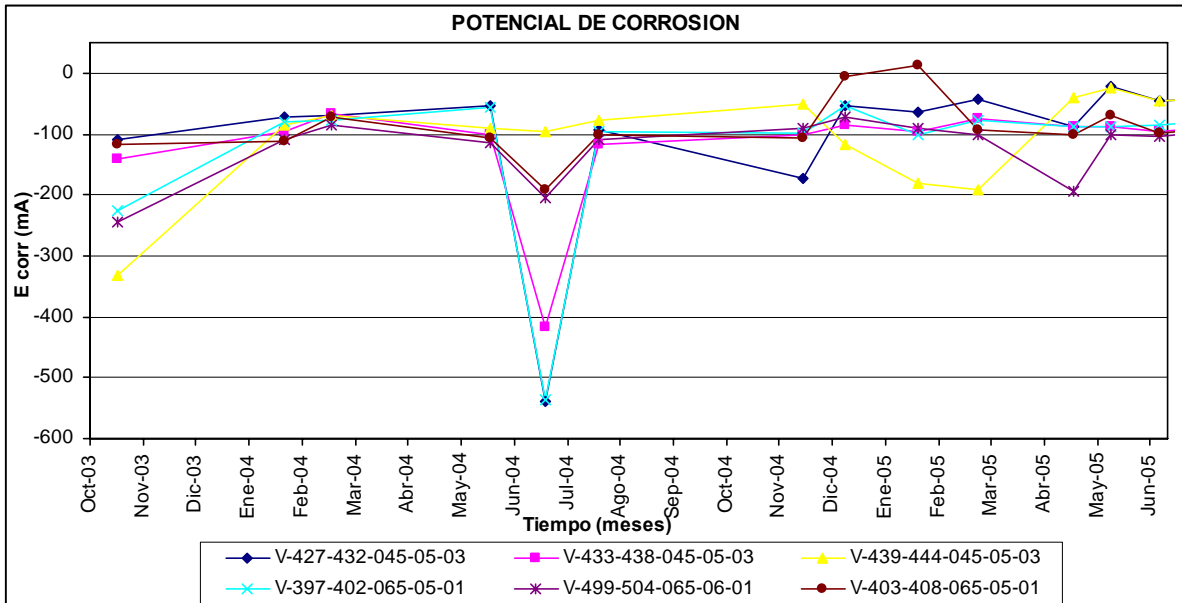
Gráfica. C. 6. Velocidad de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx5) Morelia.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación Morelia (Mx5)

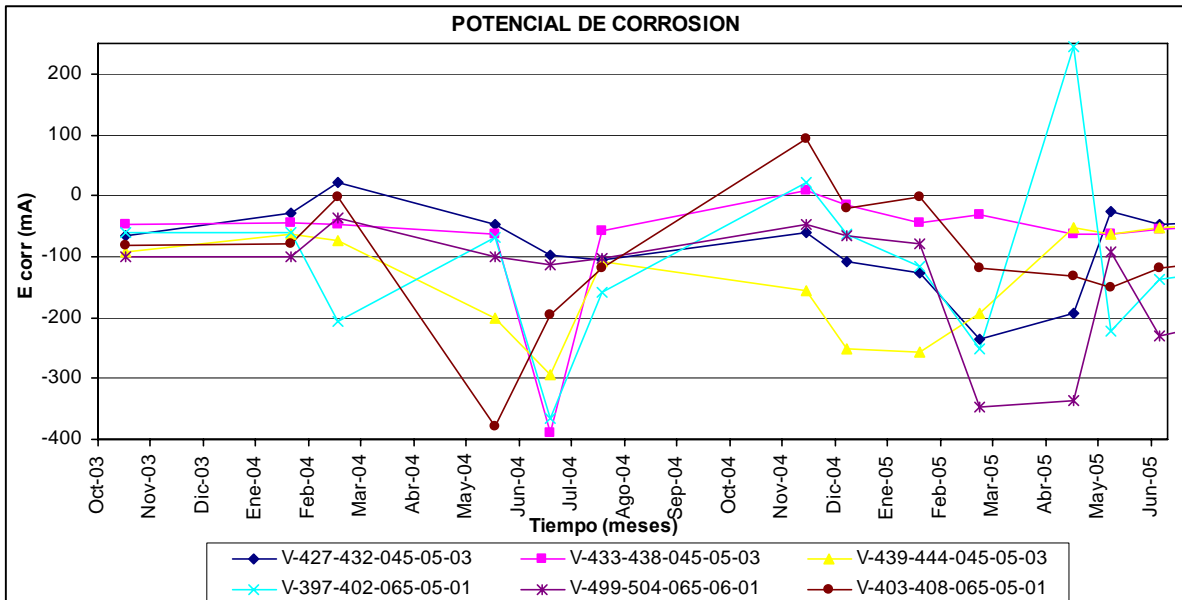
⇒ A 3.0 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 7. Potencial de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx5) Morelia.

• **Cara Resguardada C2**



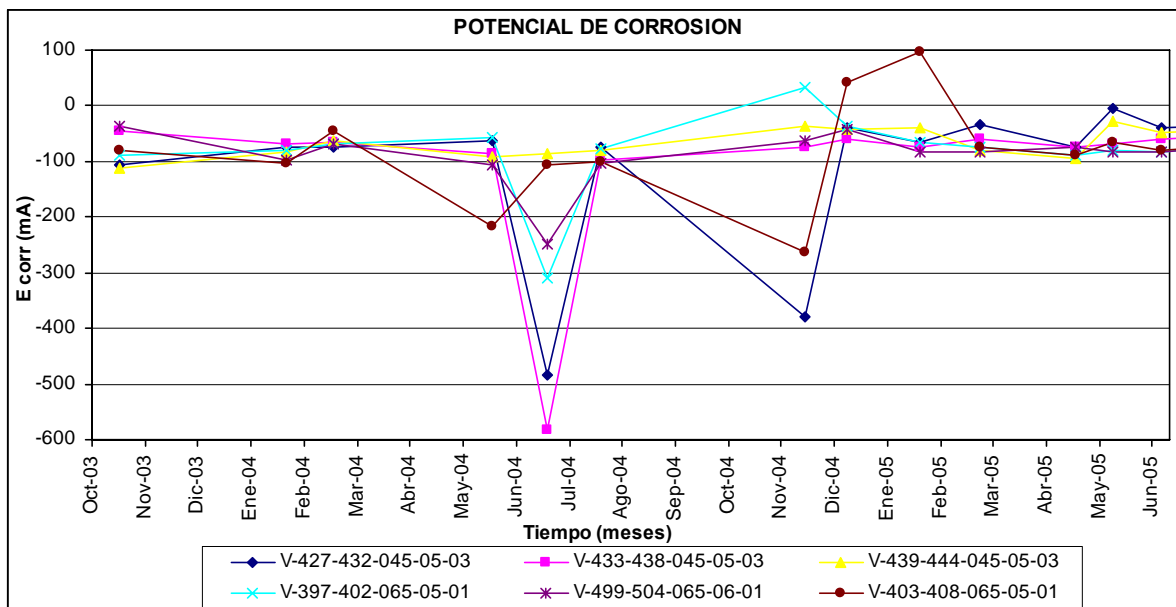
Gráfica. C. 8. Potencial de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx5) Morelia.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación Morelia (Mx5)

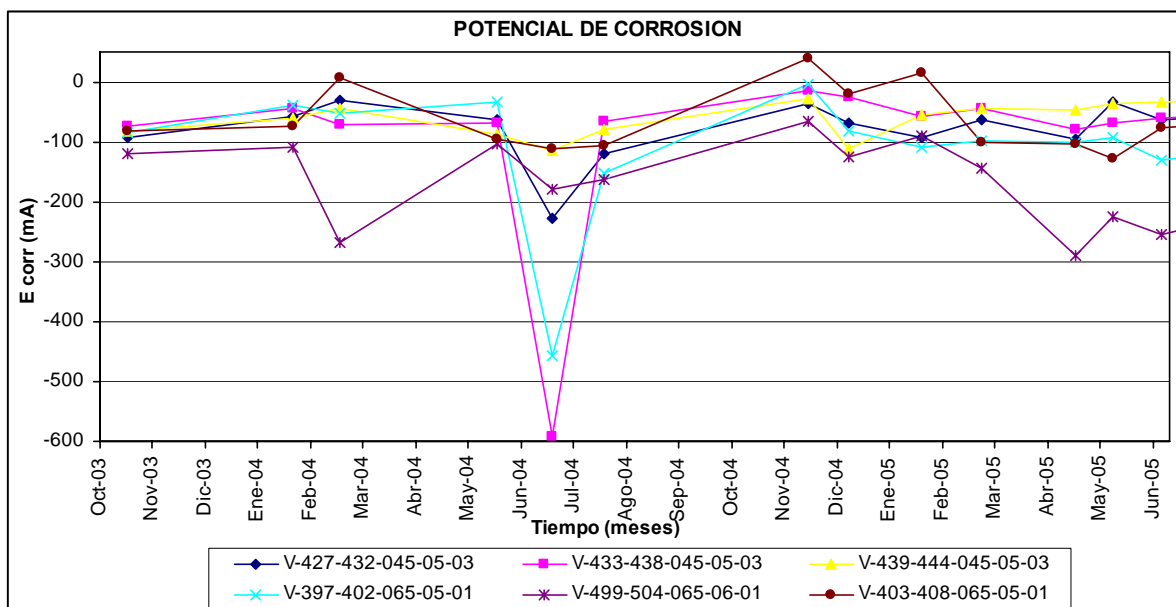
⇒ A 2.0 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 9. Potencial de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx5) Morelia.

• **Cara Resguardada C2**



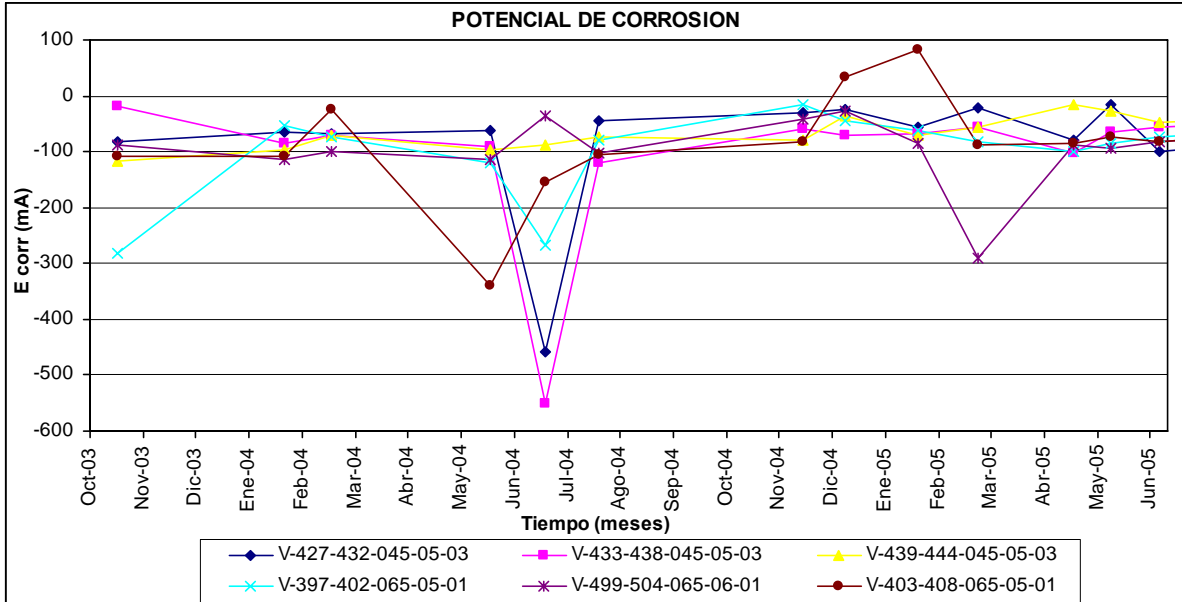
Gráfica. C. 10. Potencial de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx5) Morelia.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación Morelia (Mx5)

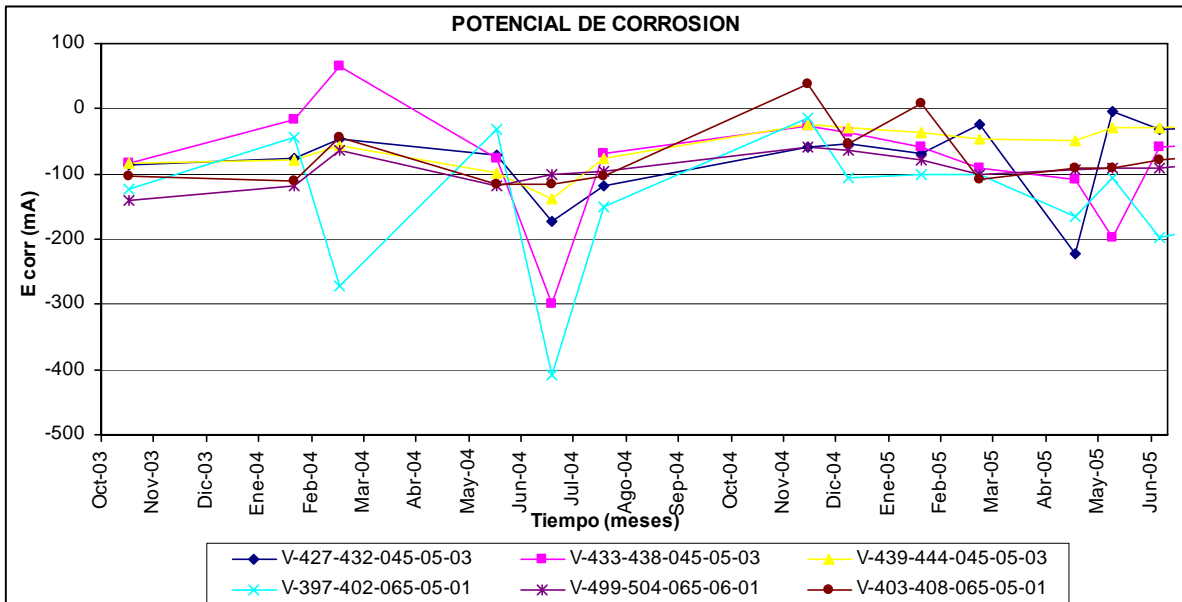
⇒ A 1.5 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 11. Potencial de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx5) Morelia.

• **Cara Resguardada C2**



Gráfica. C. 12. Potencial de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx5) Morelia.

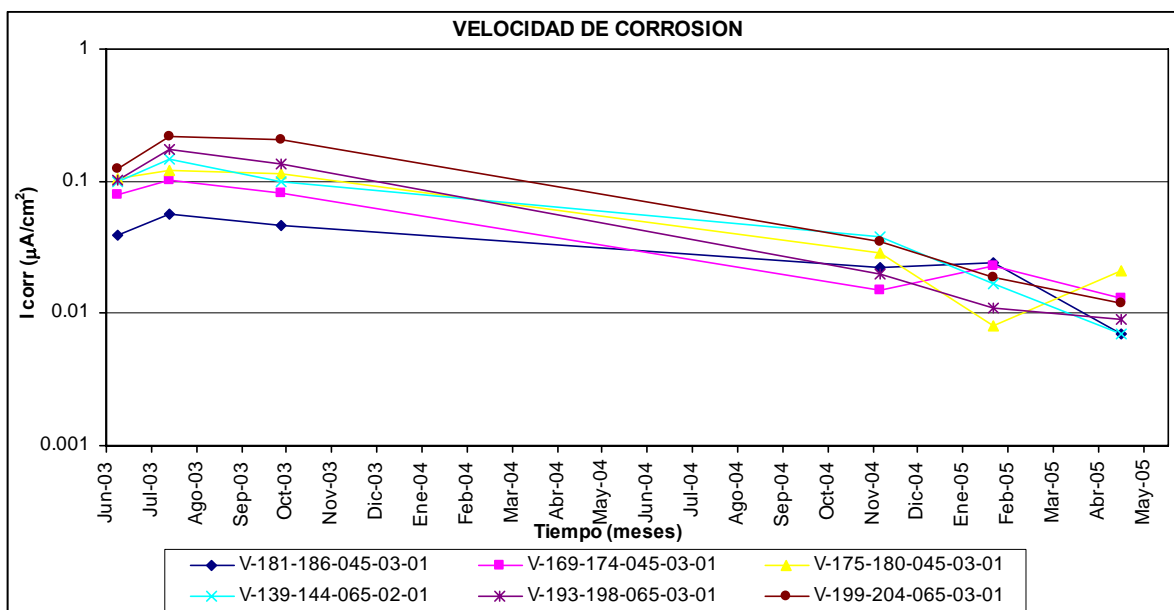
DATOS ELECTROQUIMICOS

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)]

Estación Veracruz (Mx6)

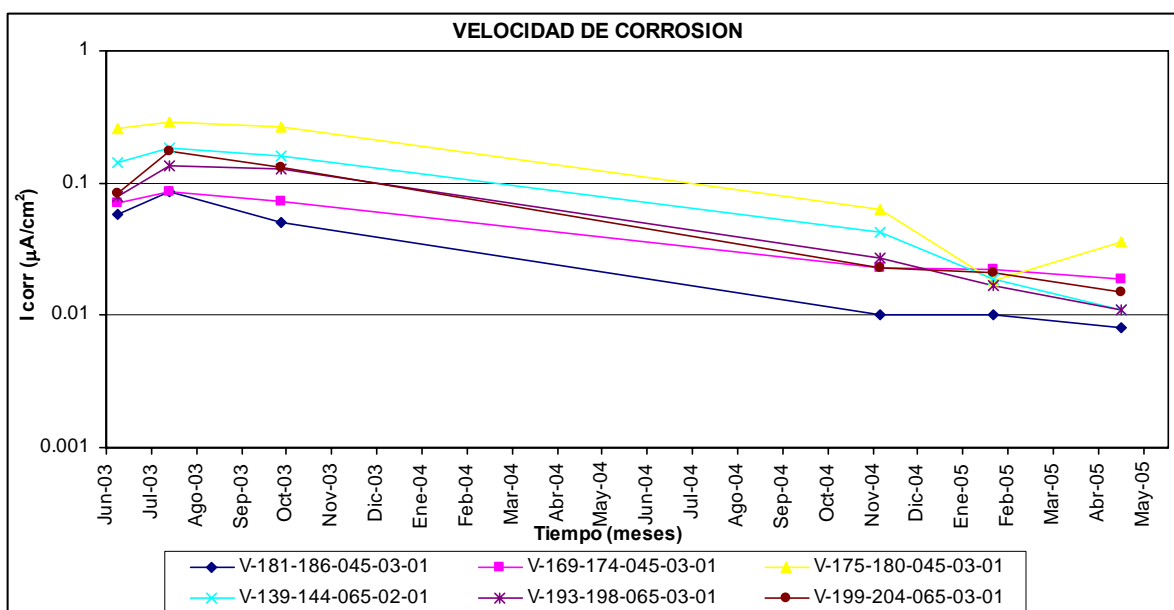
⇒ A 3.0 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 13. Velocidad de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx6) Veracruz.

• **Cara Resguardada C2**



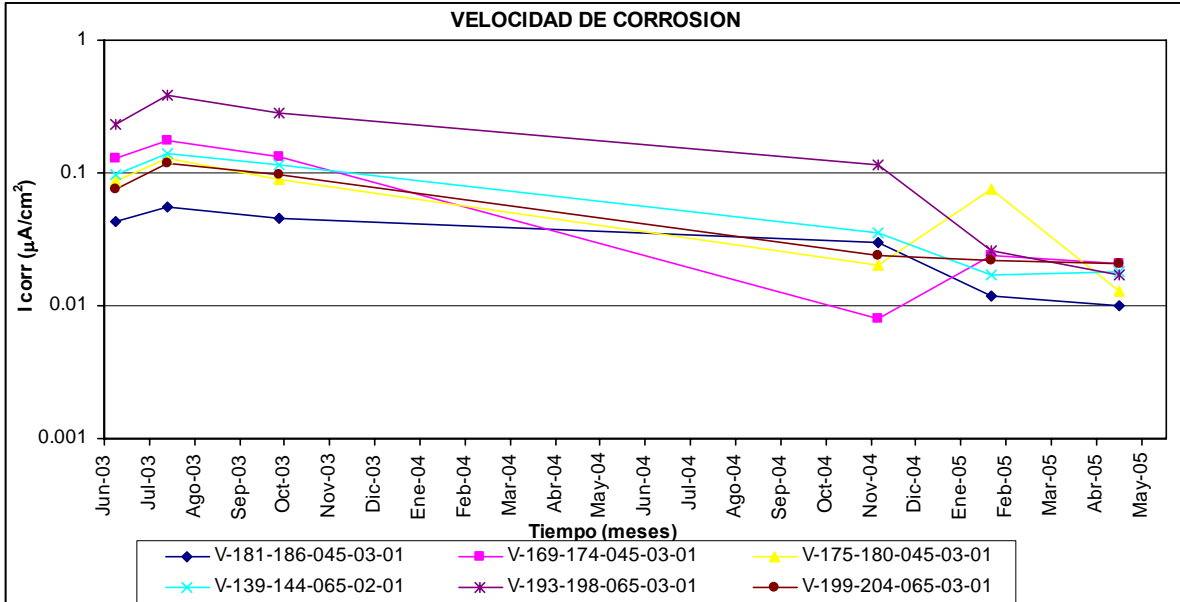
Gráfica. C. 14. Velocidad de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx6) Veracruz.

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)]

Estación Veracruz (Mx6)

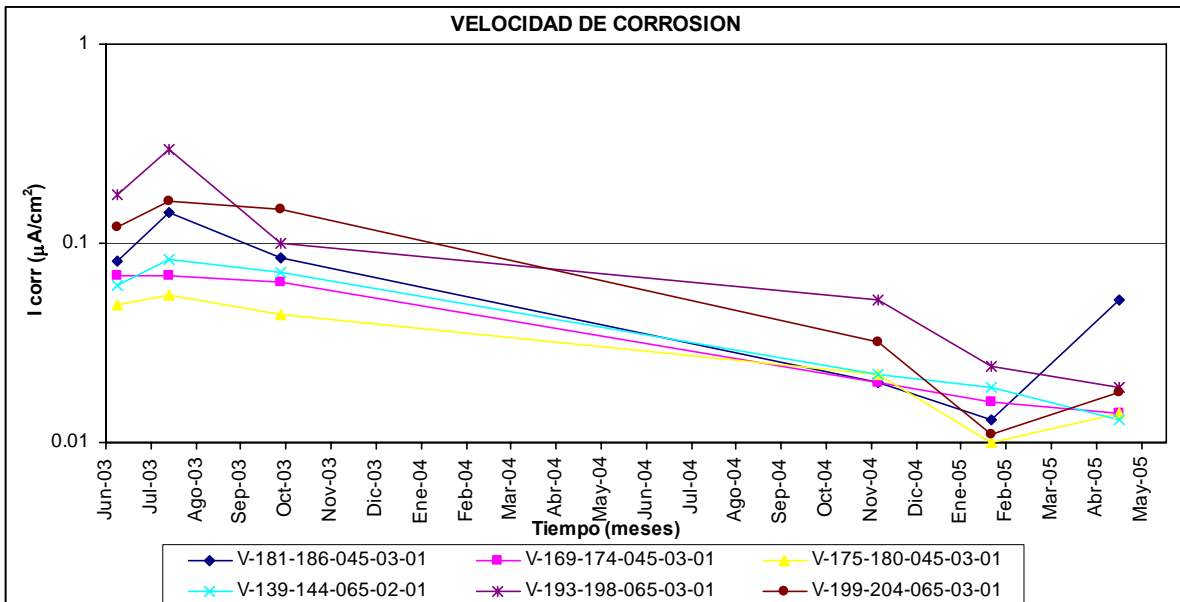
⇒ **A 2.0 cm de recubrimiento.**

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 15. Velocidad de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx6) Veracruz.

• **Cara Resguardada C2**



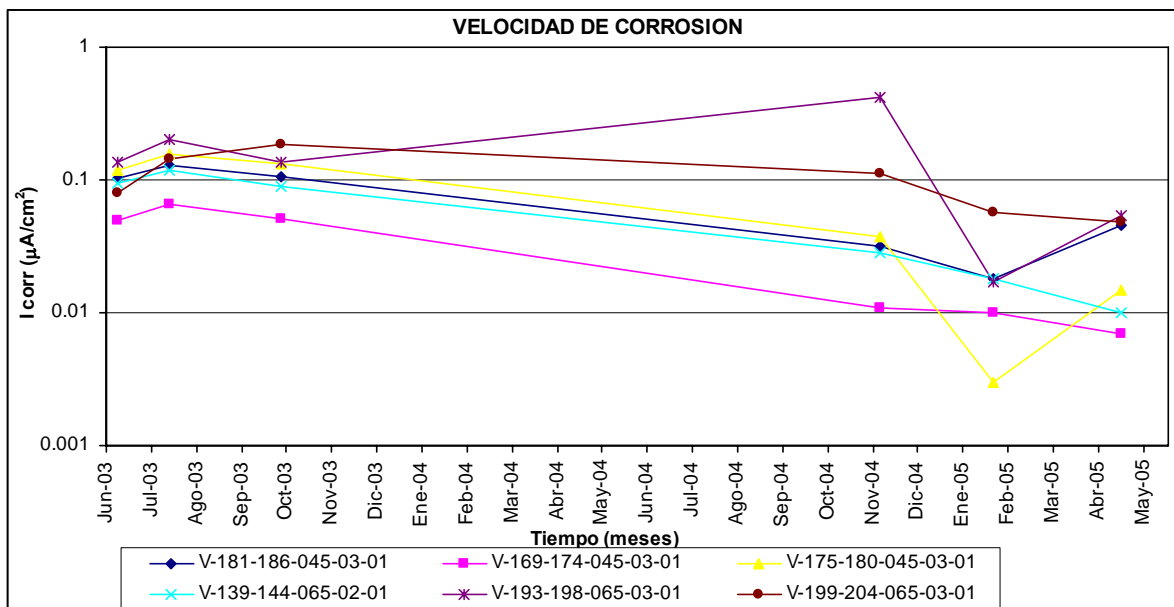
Gráfica. C. 16. Velocidad de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx6) Veracruz.

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)]

Estación Veracruz (Mx6)

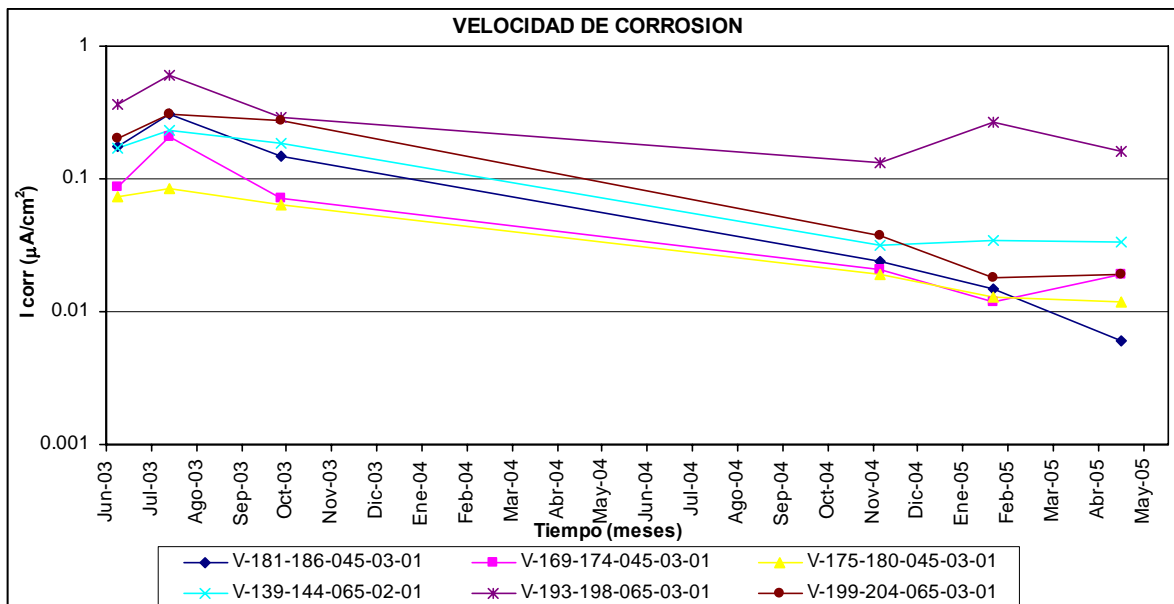
⇒ **A 1.5 cm de recubrimiento.**

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 17. Velocidad de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx6) Veracruz.

• **Cara Resguardada C2**



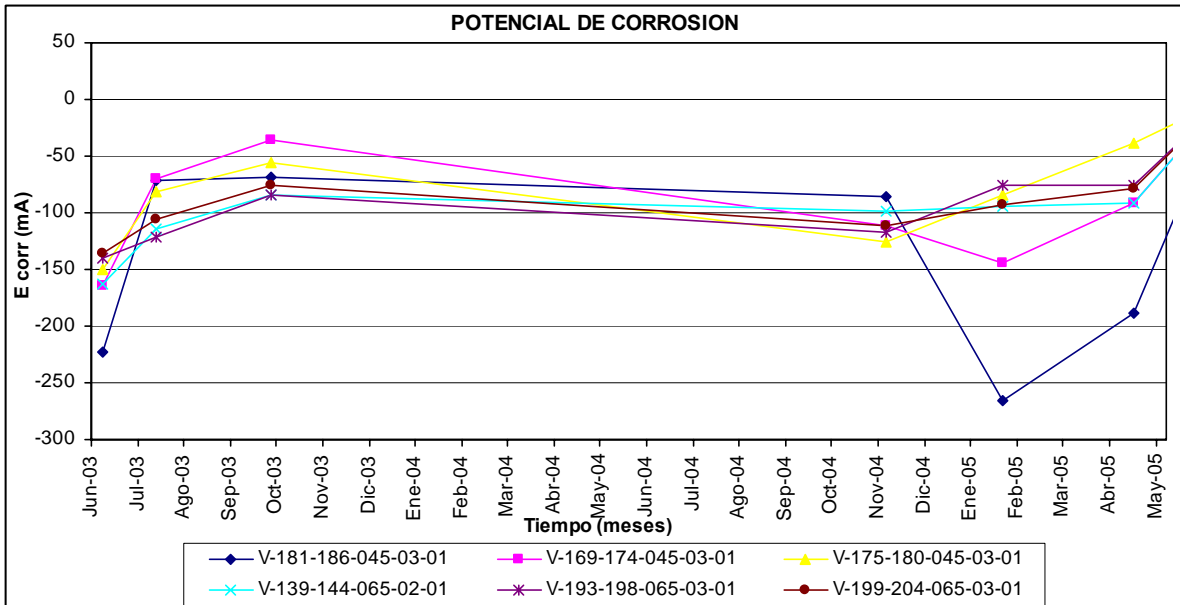
Gráfica. C. 18. Velocidad de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx6) Veracruz.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación Veracruz (Mx6)

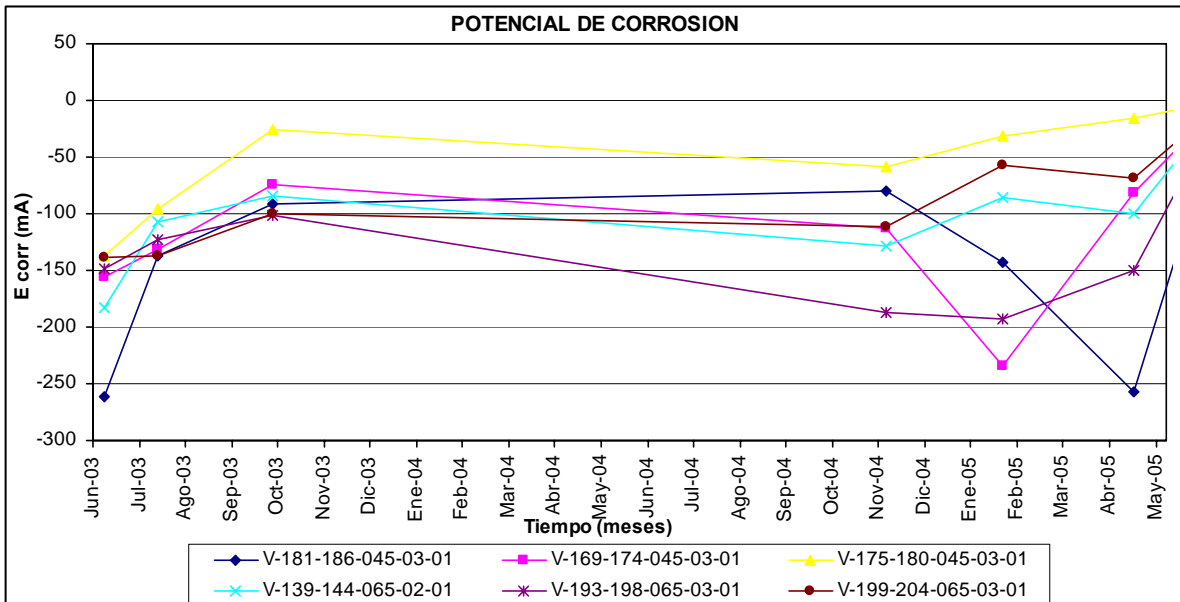
⇒ A 3.0 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 19. Potencial de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx6) Veracruz.

• **Cara Resguardada C2**



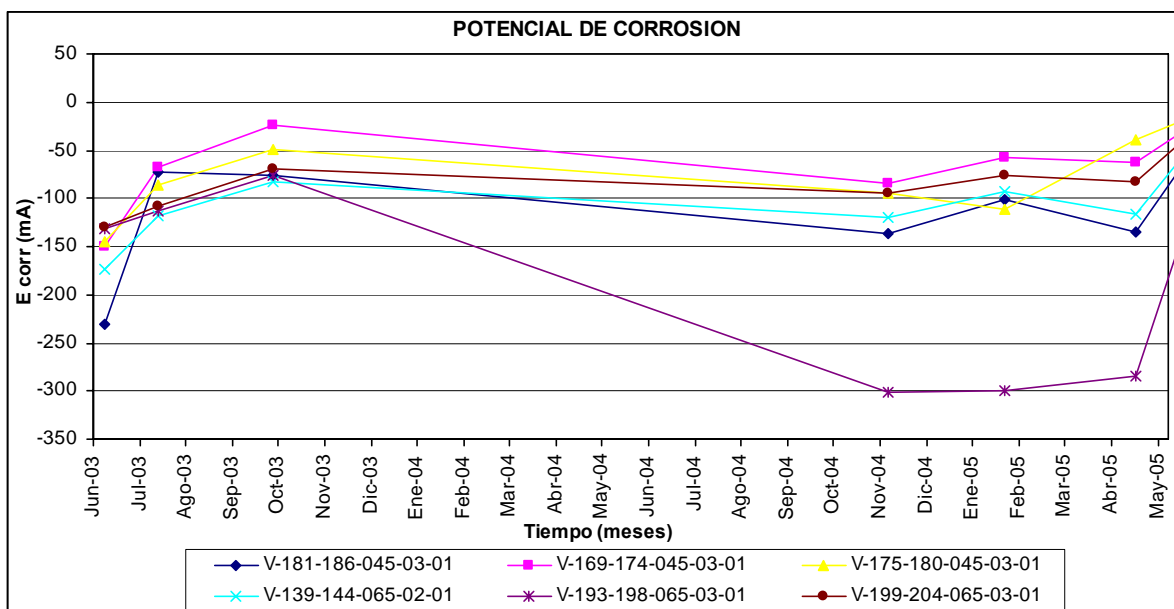
Gráfica. C. 20. Potencial de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx6) Veracruz.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación Veracruz (Mx6)

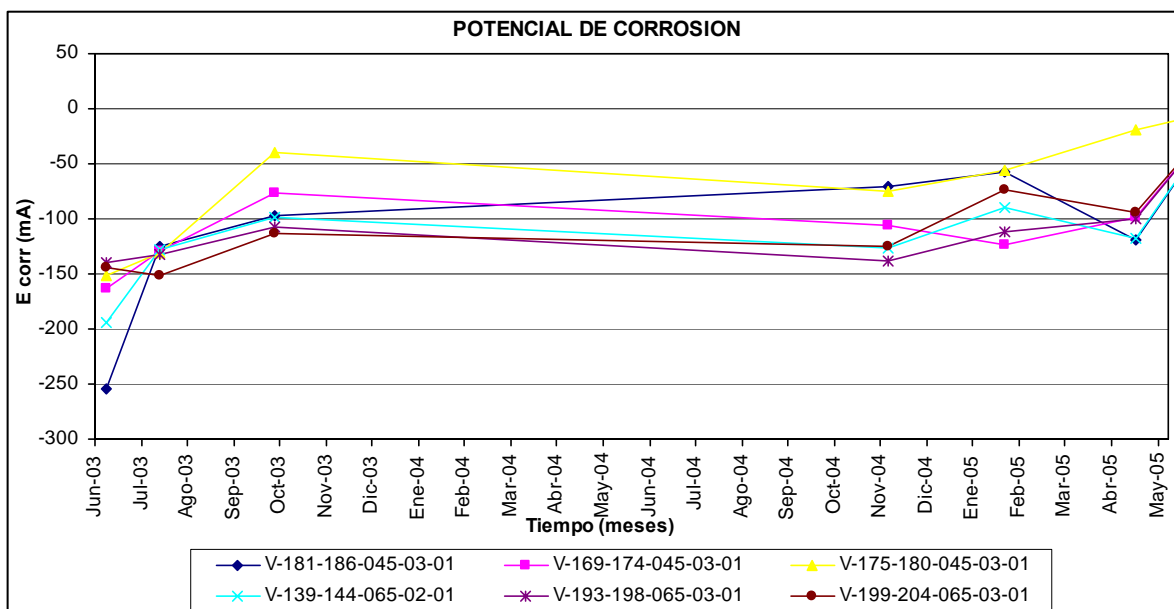
⇒ A 2.0 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 21. Potencial de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx6) Veracruz.

• **Cara Resguardada C2**



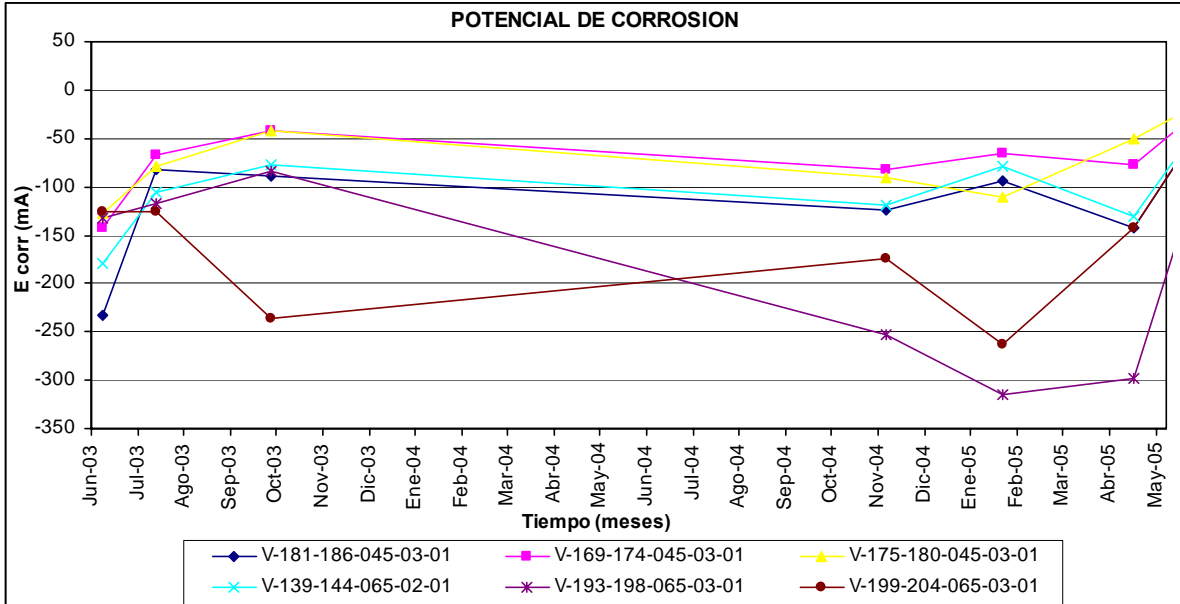
Gráfica. C. 22. Potencial de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx6) Veracruz.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación Veracruz (Mx6)

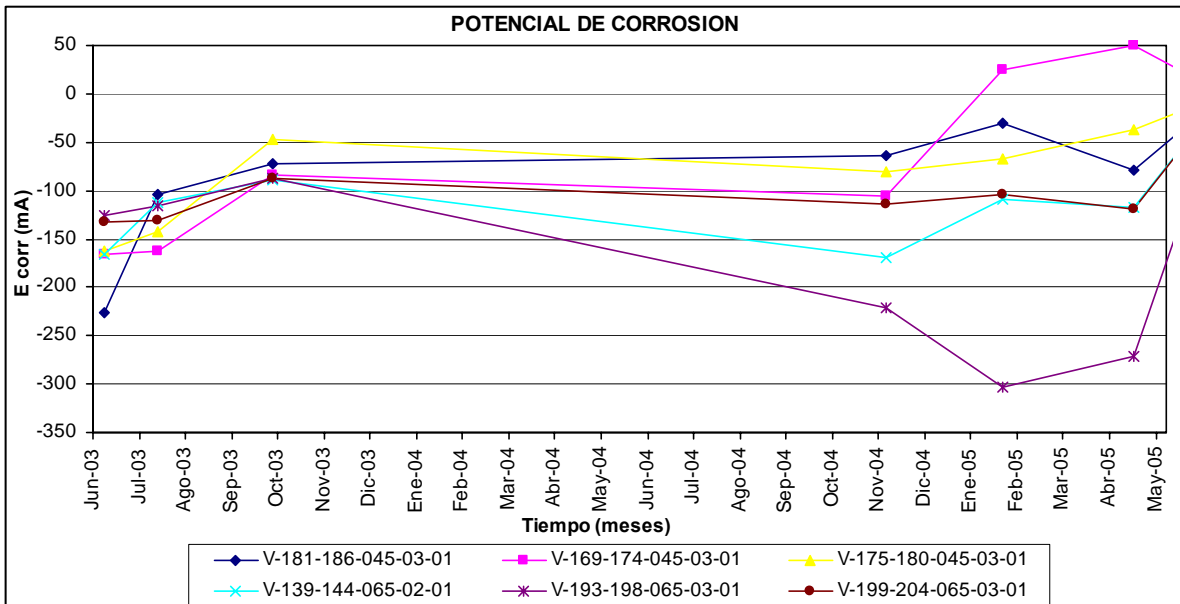
⇒ A 1.5 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 23. Potencial de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx6) Veracruz.

• **Cara Resguardada C2**



Gráfica. C. 24. Potencial de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx6) Veracruz.

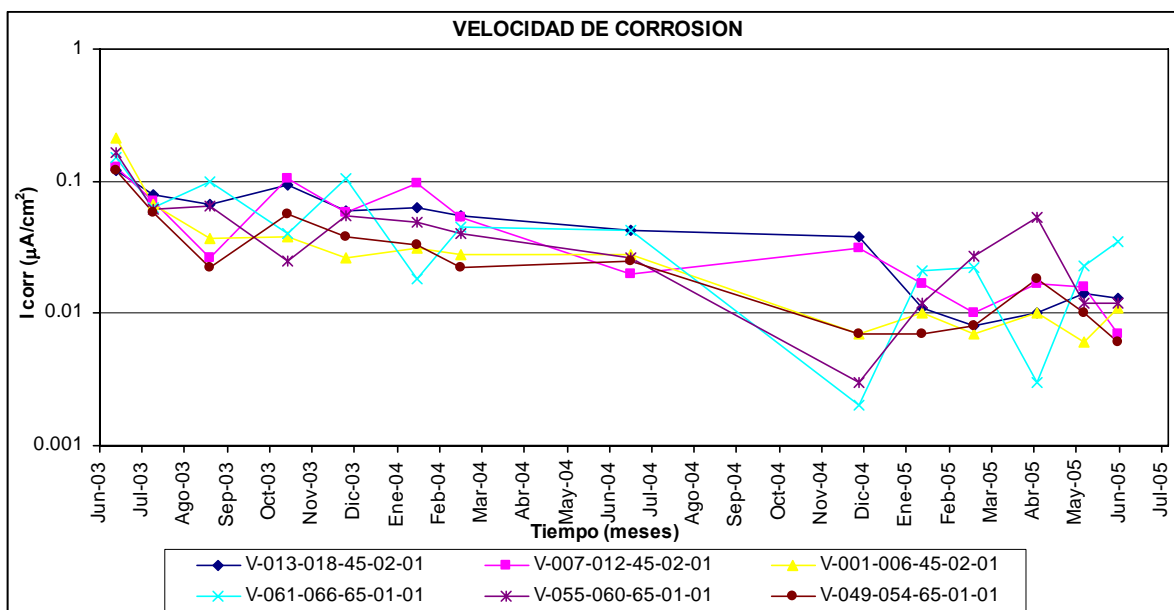
DATOS ELECTROQUIMICOS

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)]

Estación México, D.F. (Mx7)

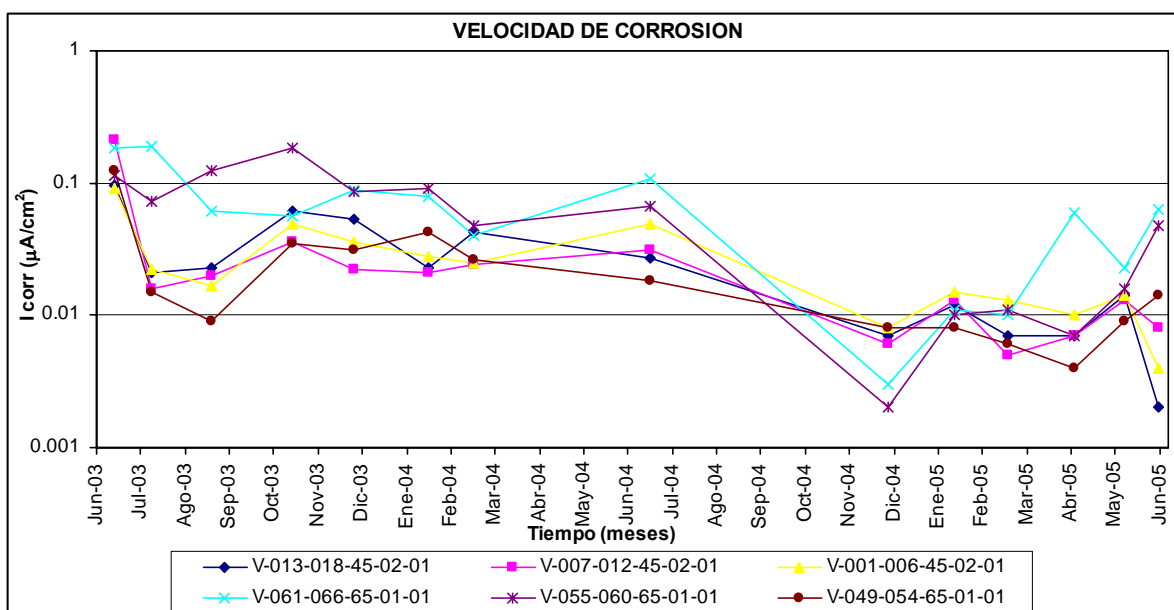
⇒ A 3.0 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 25. Velocidad de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx7) México, D.F.

• **Cara Resguardada C2**



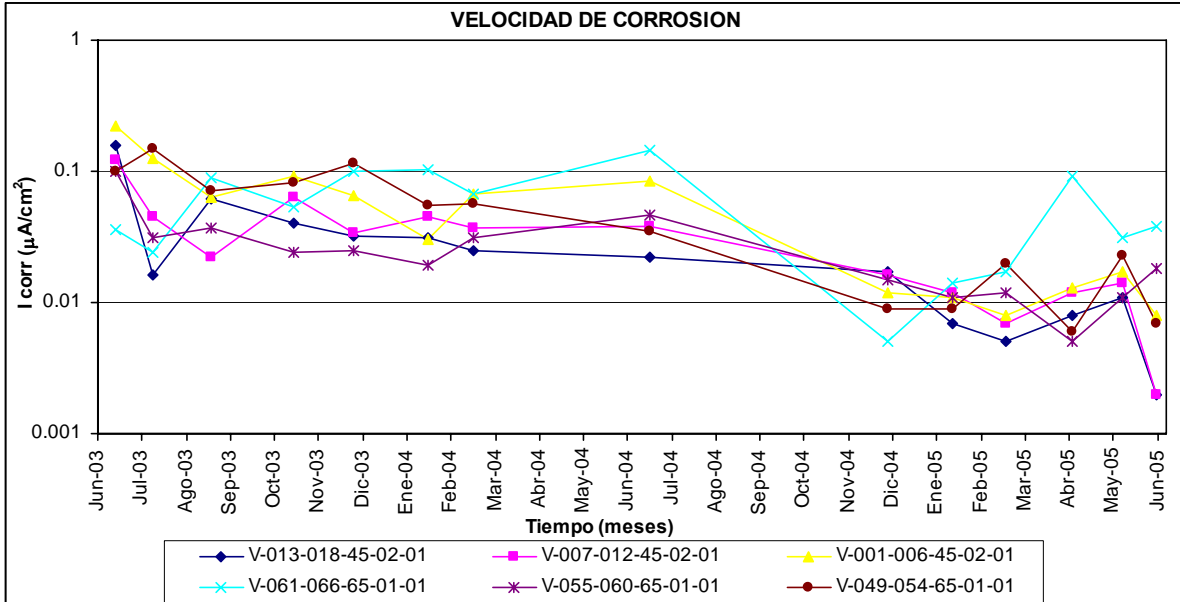
Gráfica. C. 26. Velocidad de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx7) México, D.F.

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} ($\mu A/cm^2$)]

Estación México, D.F. (Mx7)

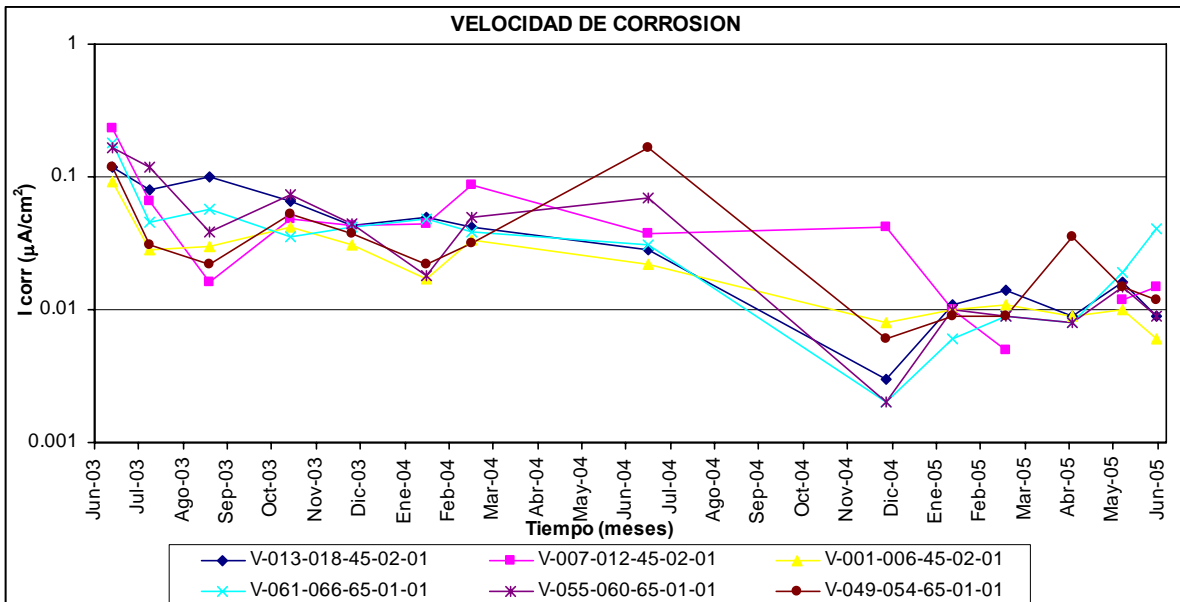
⇒ **A 2.0 cm de recubrimiento.**

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 27. Velocidad de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx7) México, D.F.

• **Cara Resguardada C2**



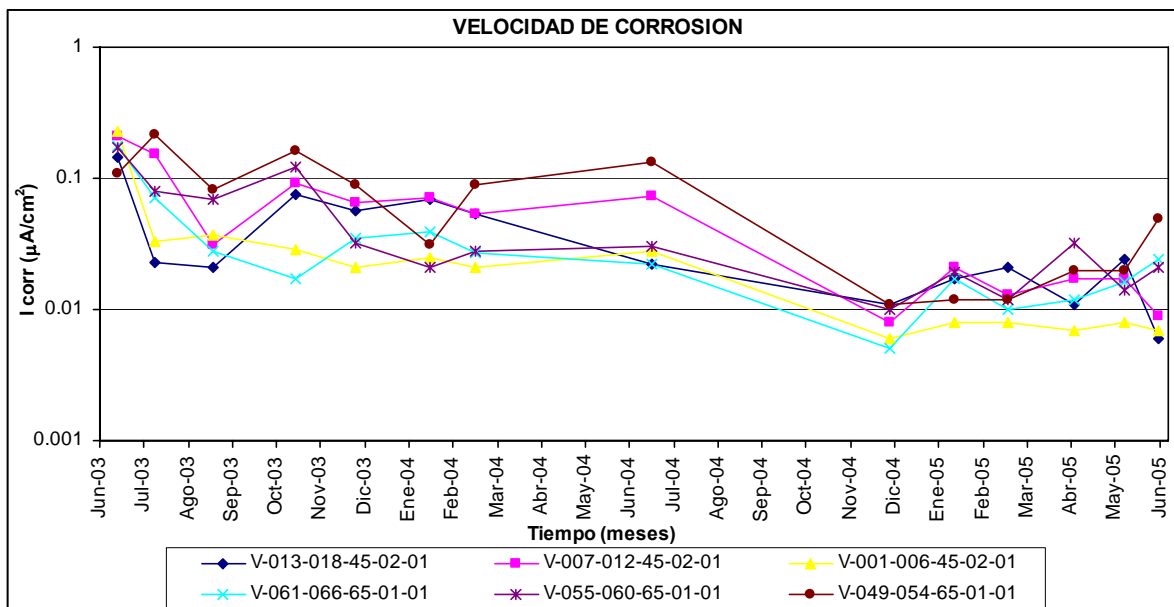
Gráfica. C. 28. Velocidad de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx7) México, D.F.

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)]

Estación México, D.F. (Mx7)

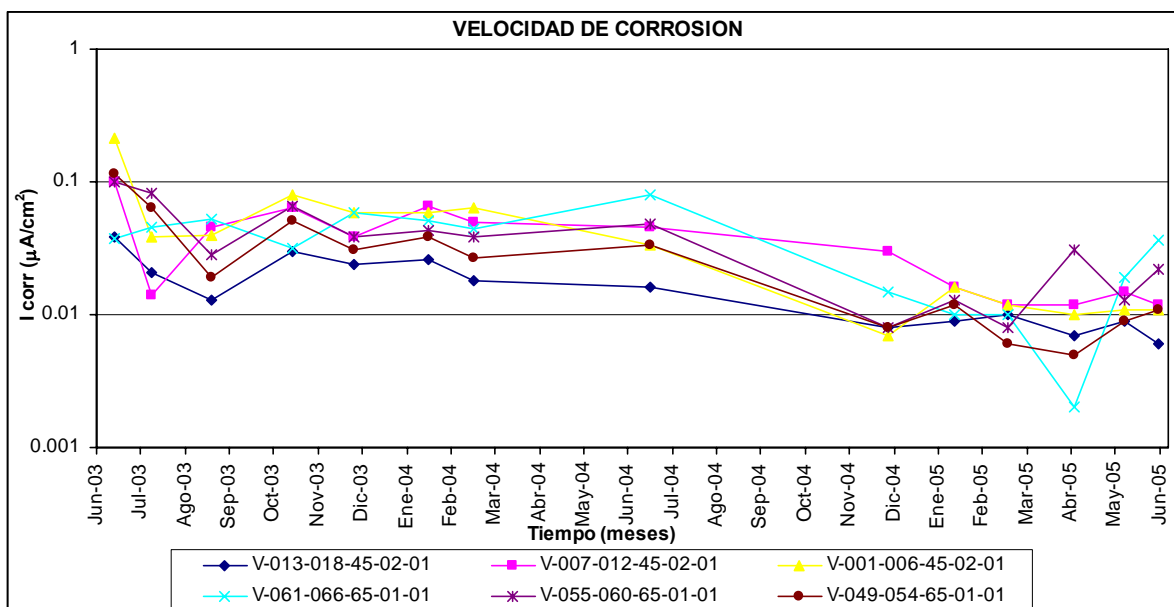
⇒ A 1.5 cm de recubrimiento.

• Cara Expuesta C1



Gráfica. C. 29. Velocidad de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx7) México, D.F.

• Cara Resguardada C2



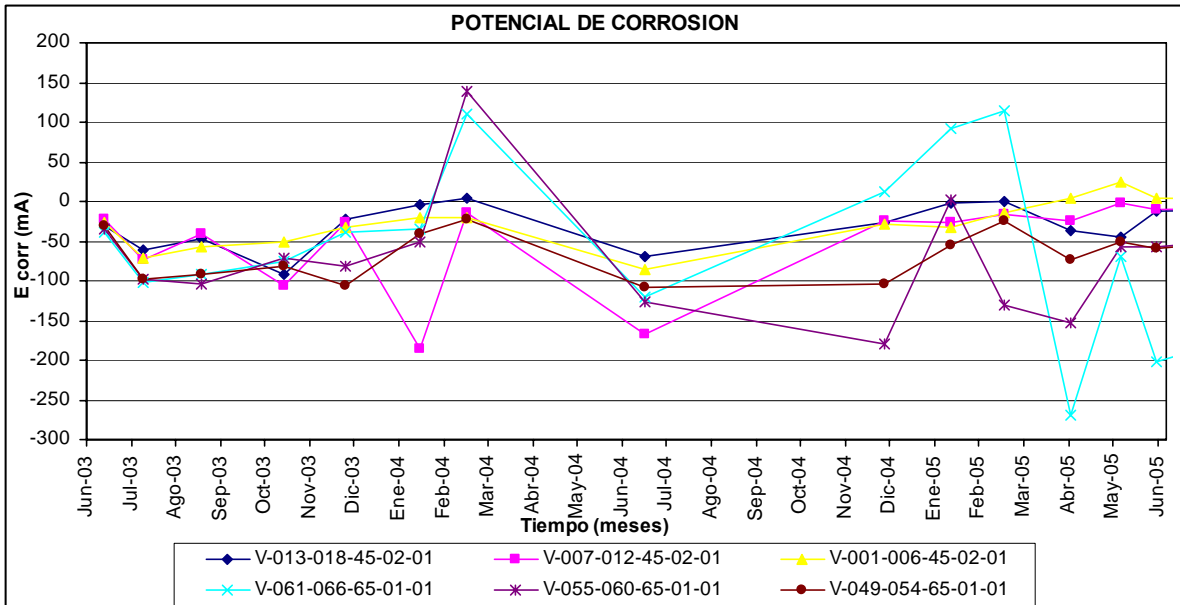
Gráfica. C. 30. Velocidad de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx7) México, D.F.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación México, D.F. (Mx7)

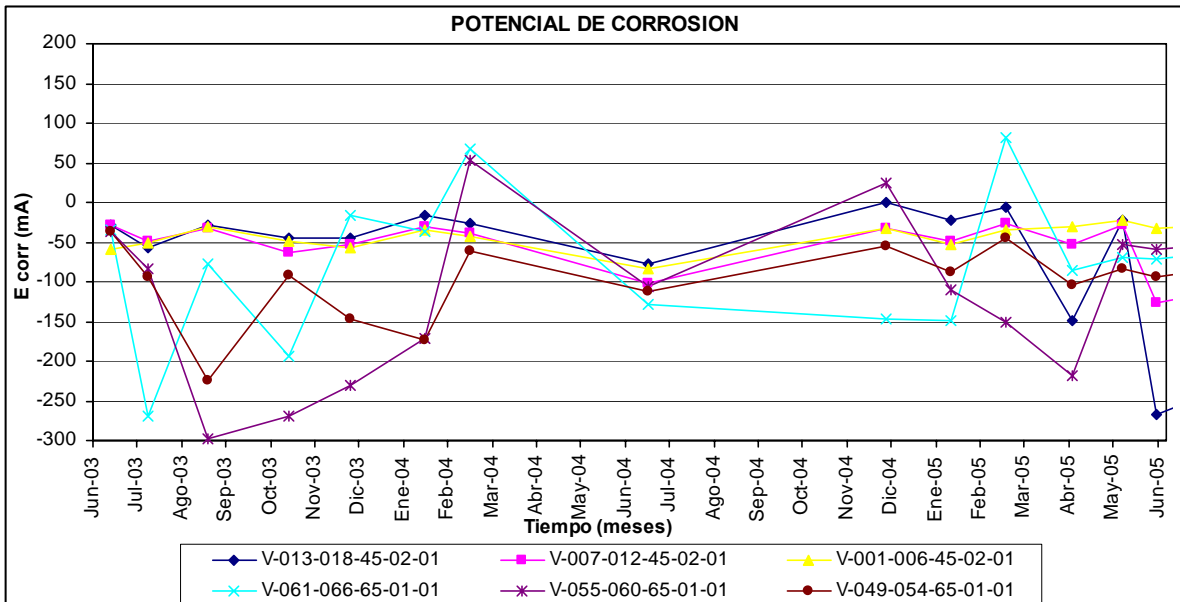
⇒ A 3.0 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 31. Potencial de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx7) México, D.F.

• **Cara Resguardada C2**



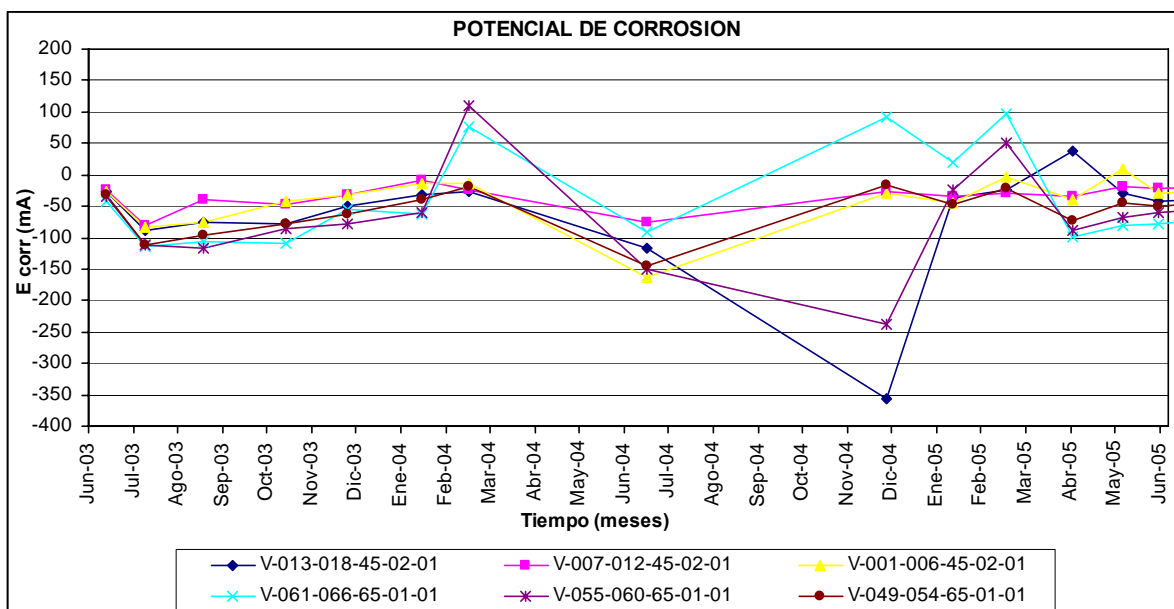
Gráfica. C. 32. Potencial de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx7) México, D.F.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación México, D.F. (Mx7)

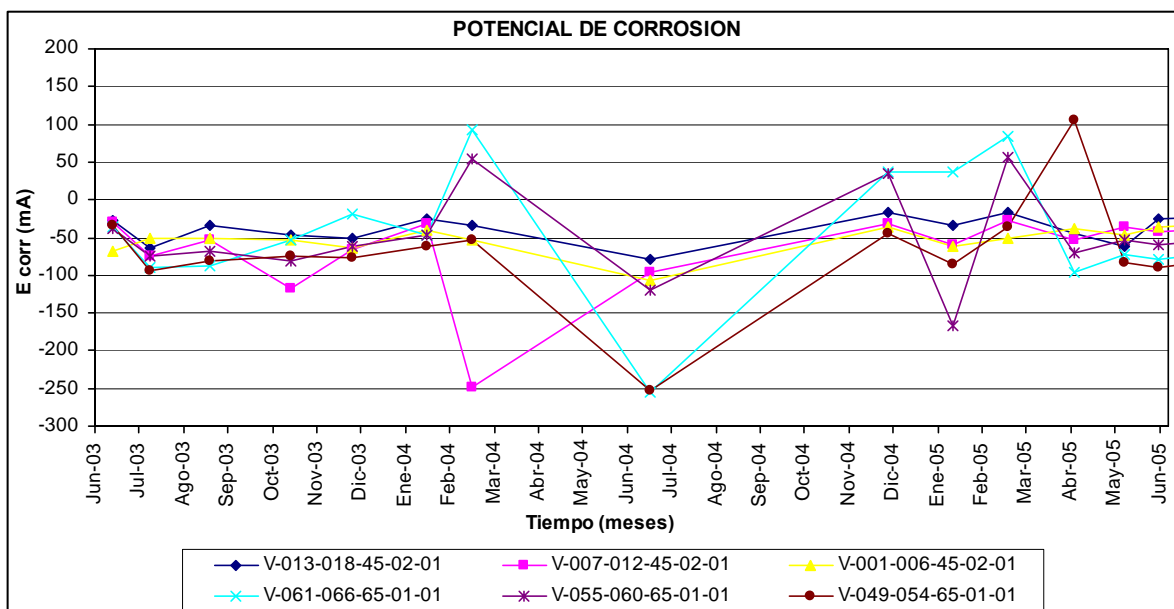
⇒ A 2.0 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 33. Potencial de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx7) México, D.F.

• **Cara Resguardada C2**



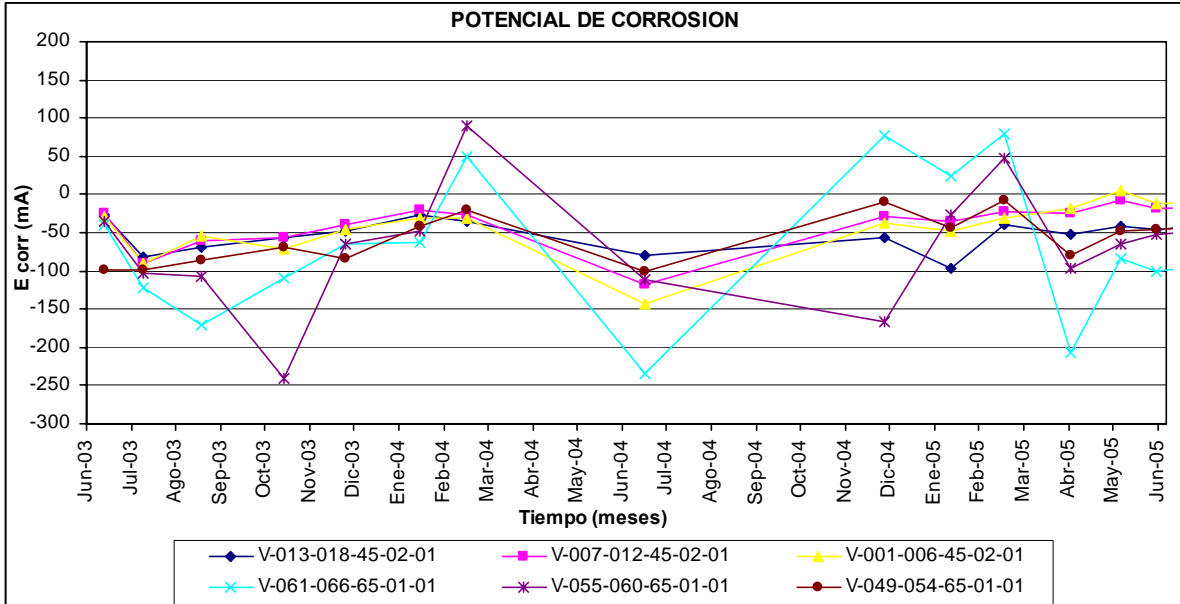
Gráfica. C. 34. Potencial de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx7) México, D.F.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación México, D.F. (Mx7)

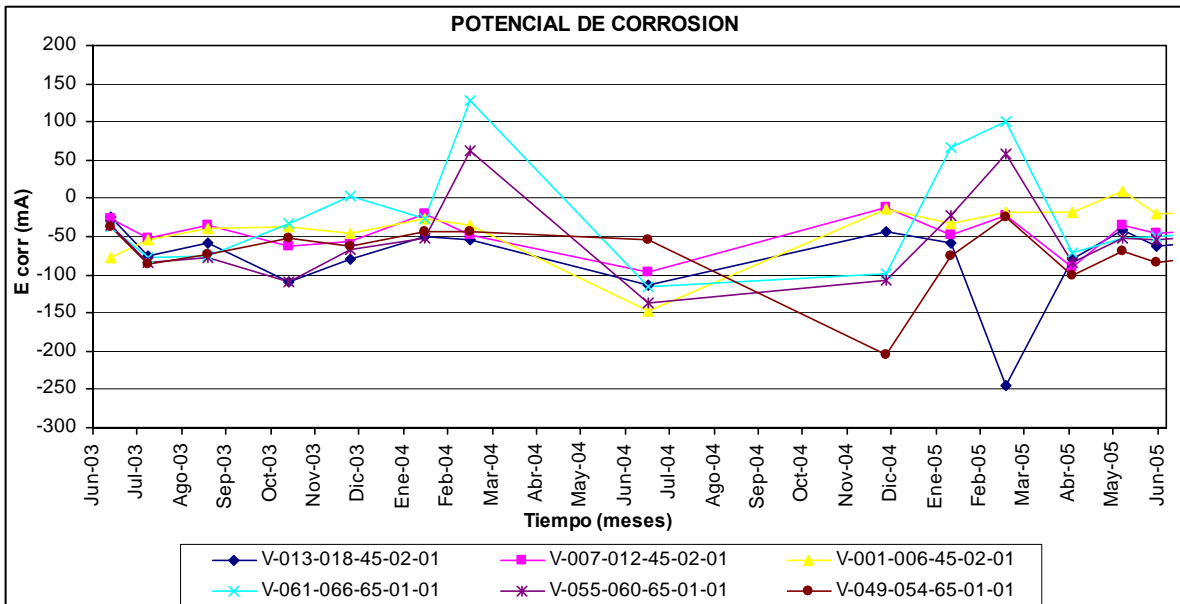
⇒ A 1.5 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 35. Potencial de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx7) México, D.F.

• **Cara Resguardada C2**



Gráfica. C. 36. Potencial de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx7) México, D.F.

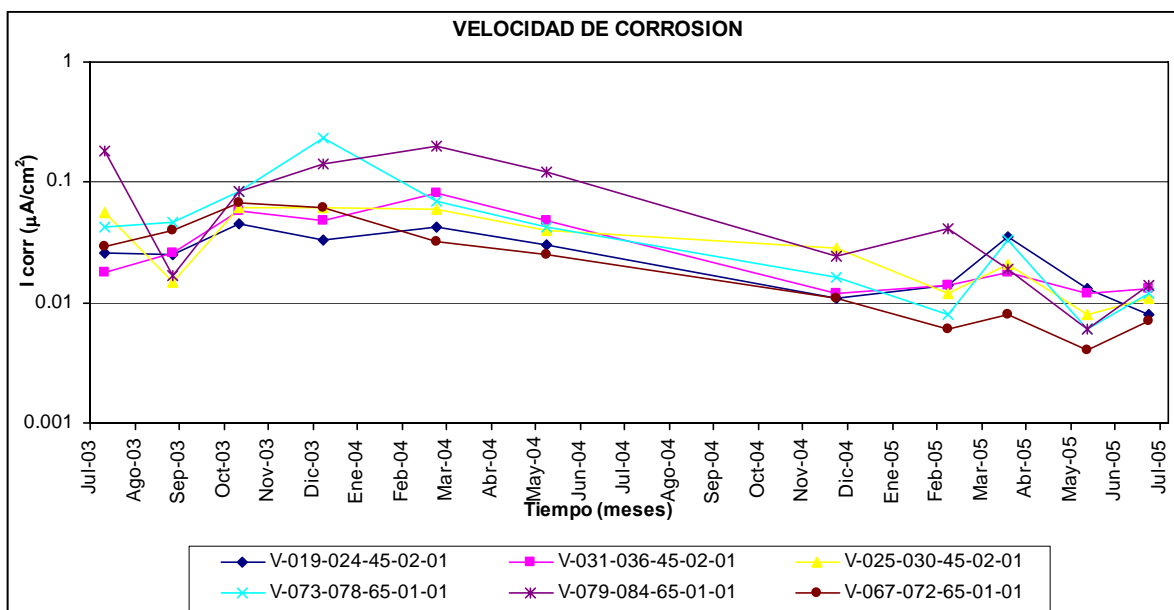
DATOS ELECTROQUIMICOS

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} ($\mu A/cm^2$)]

Estación Querétaro (Mx8)

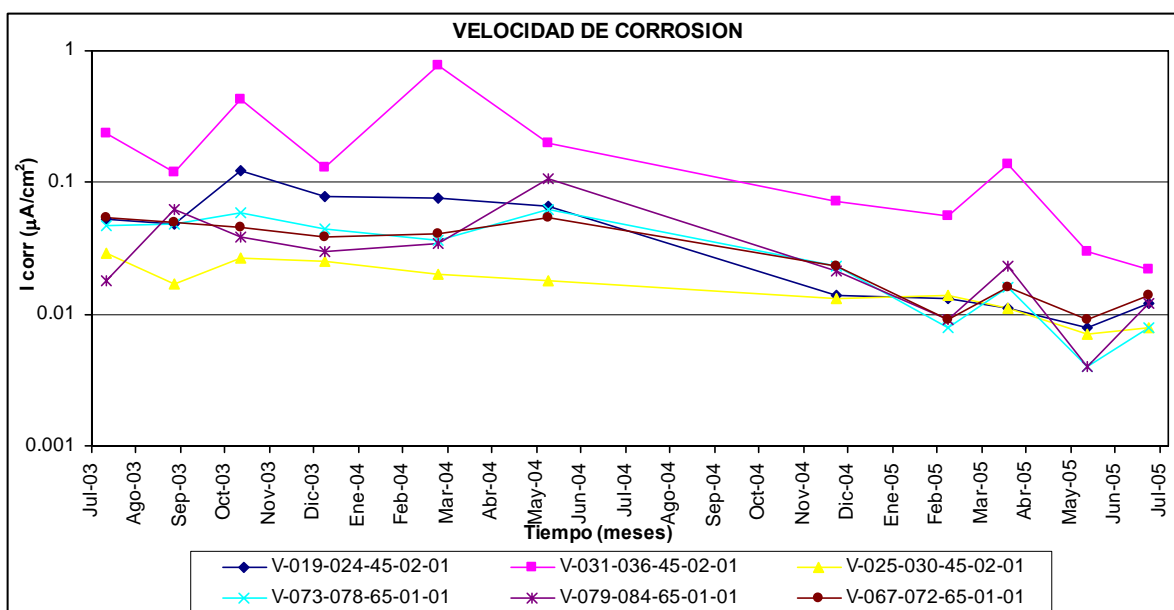
⇒ A 3.0 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 37. Velocidad de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx8) Querétaro.

• **Cara Resguardada C2**



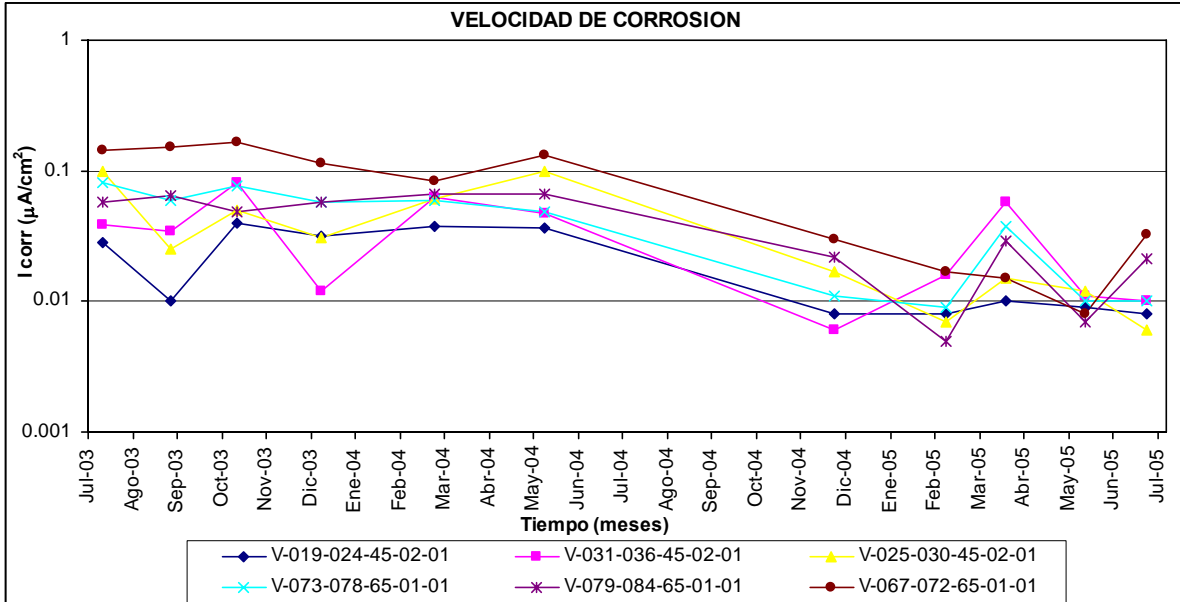
Gráfica. C. 38. Velocidad de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx8) Querétaro.

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)]

Estación Querétaro (Mx8)

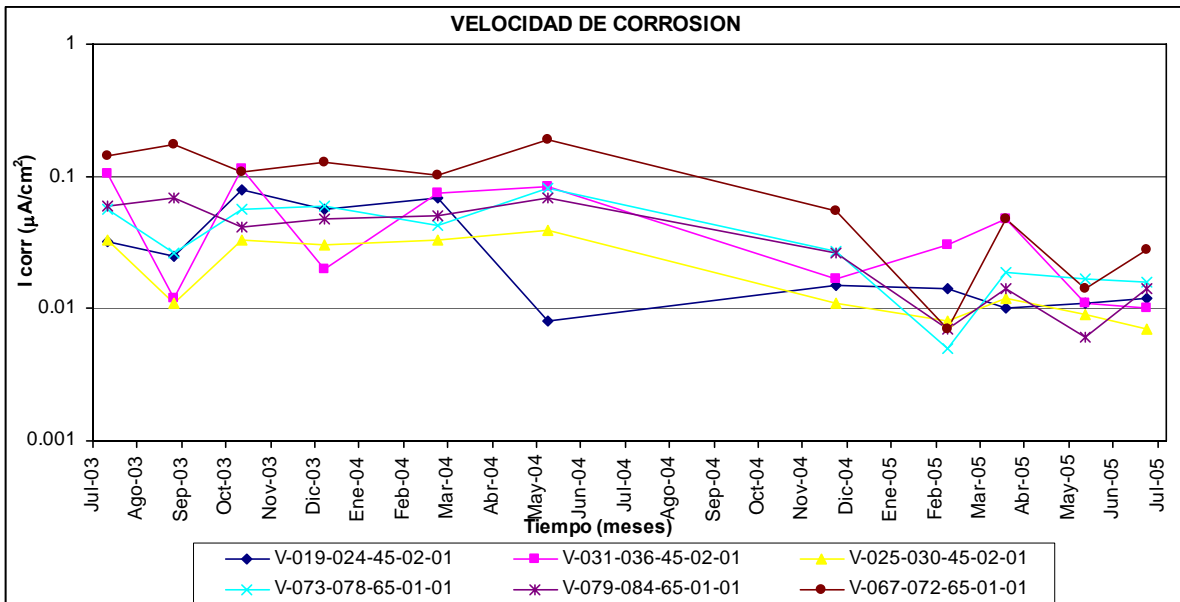
⇒ **A 2.0 cm de recubrimiento.**

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 39. Velocidad de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx8) Querétaro.

• **Cara Resguardada C2**



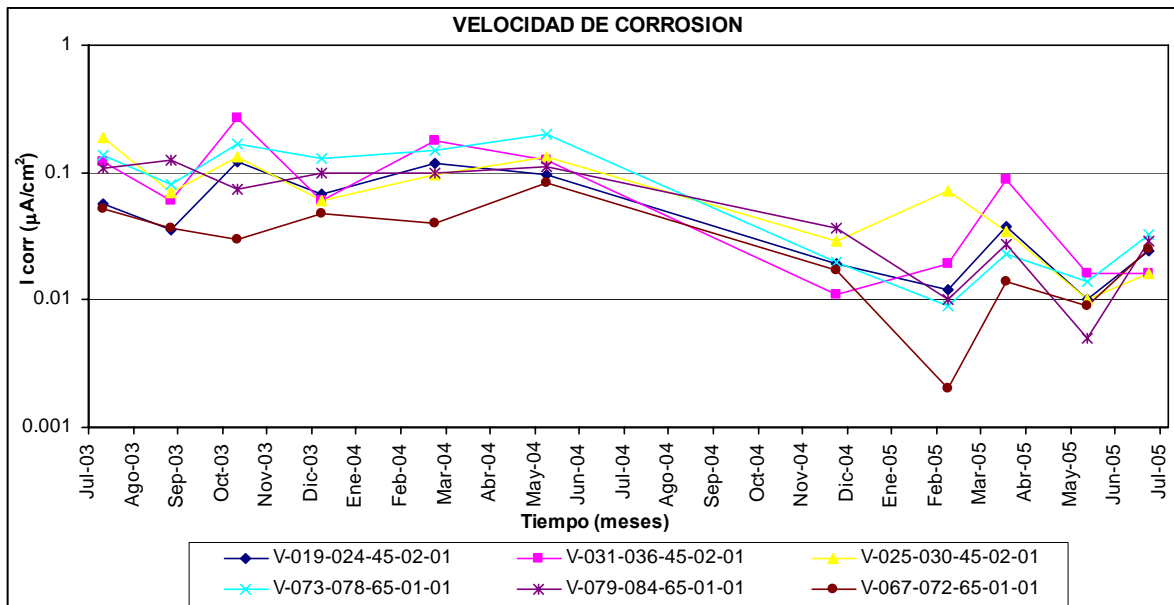
Gráfica. C. 40. Velocidad de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx8) Querétaro.

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} ($\mu A/cm^2$)]

Estación Querétaro (Mx8)

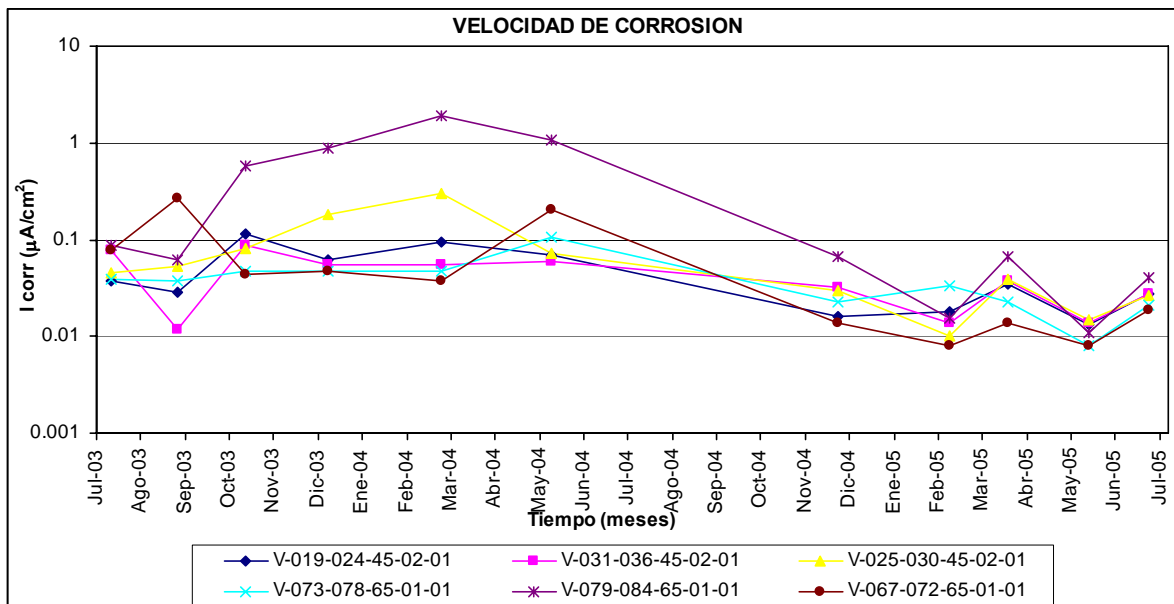
⇒ **A 1.5 cm de recubrimiento.**

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 41. Velocidad de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx8) Querétaro.

• **Cara Resguardada C2**



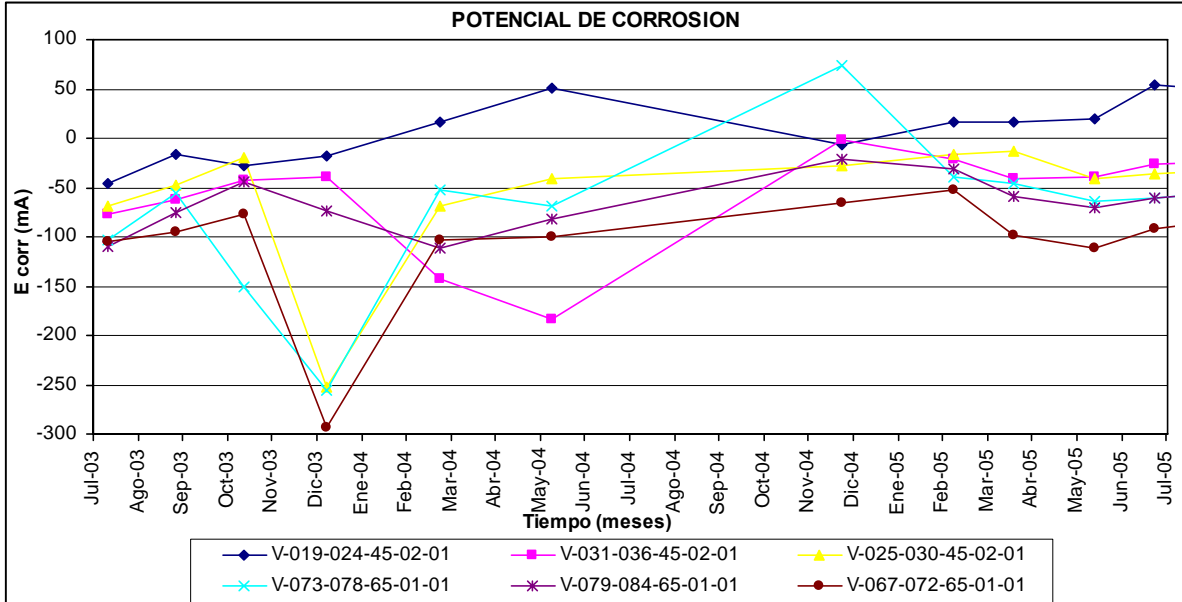
Gráfica. C. 42. Velocidad de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx8) Querétaro.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación Querétaro (Mx8)

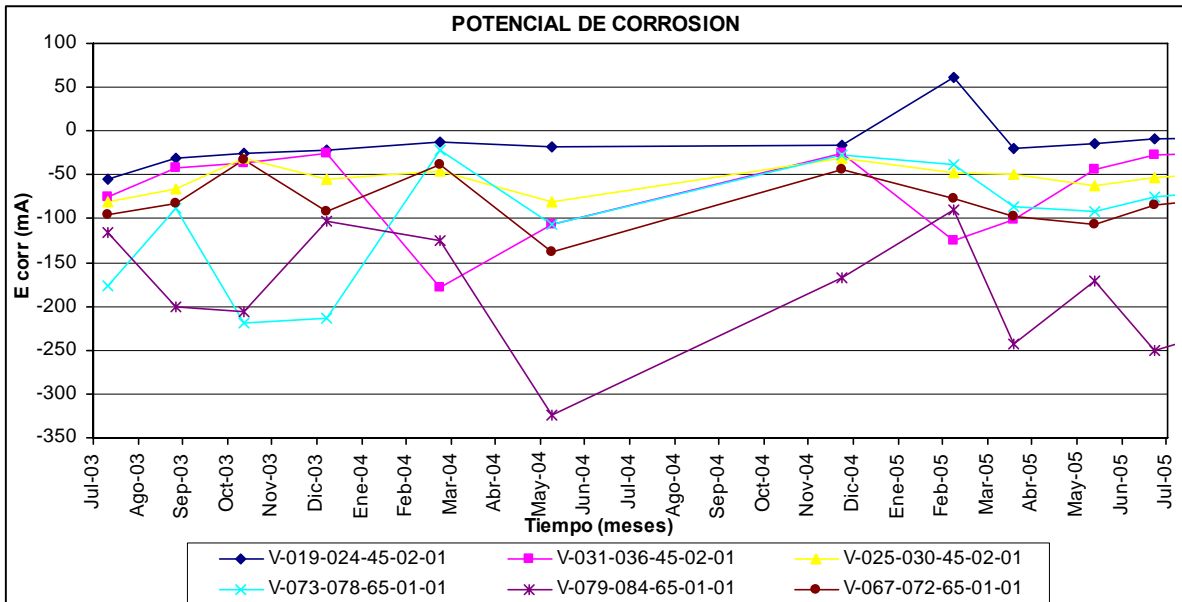
⇒ A 3.0 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 43. Potencial de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx8) Querétaro.

• **Cara Resguardada C2**



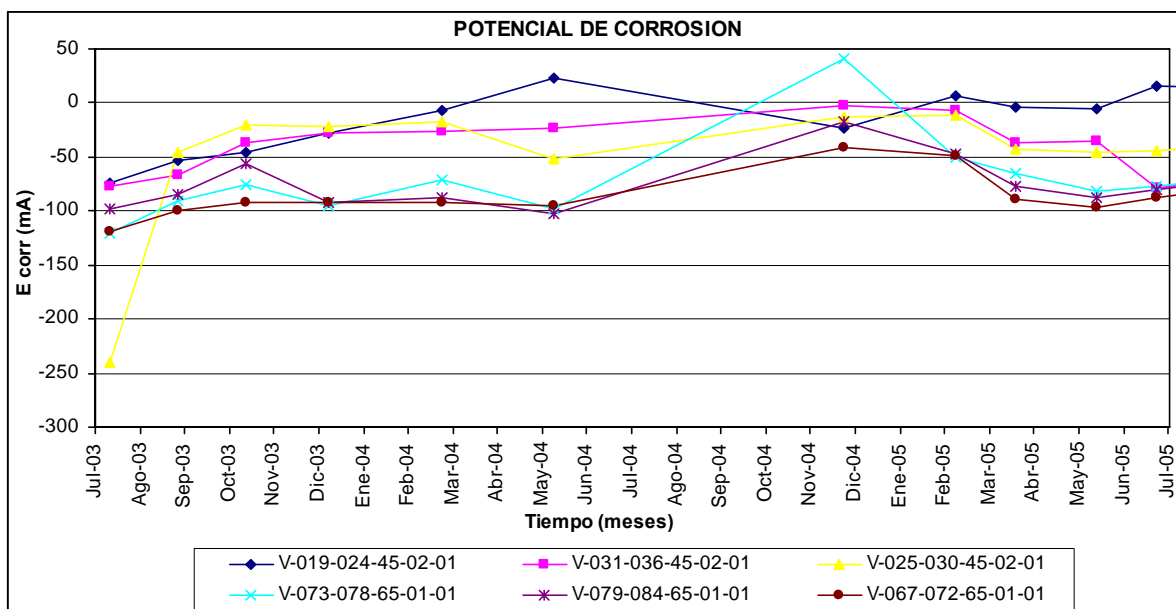
Gráfica. C. 44. Potencial de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx8) Querétaro.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación Querétaro (Mx8)

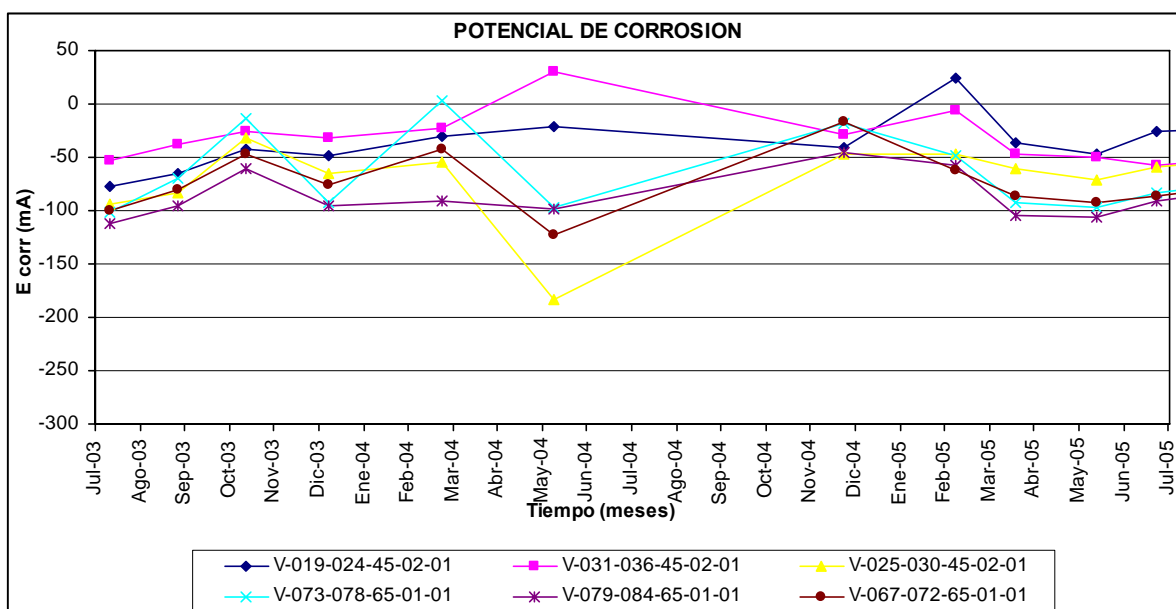
⇒ A 2.0 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 45. Potencial de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx8) Querétaro.

• **Cara Resguardada C2**



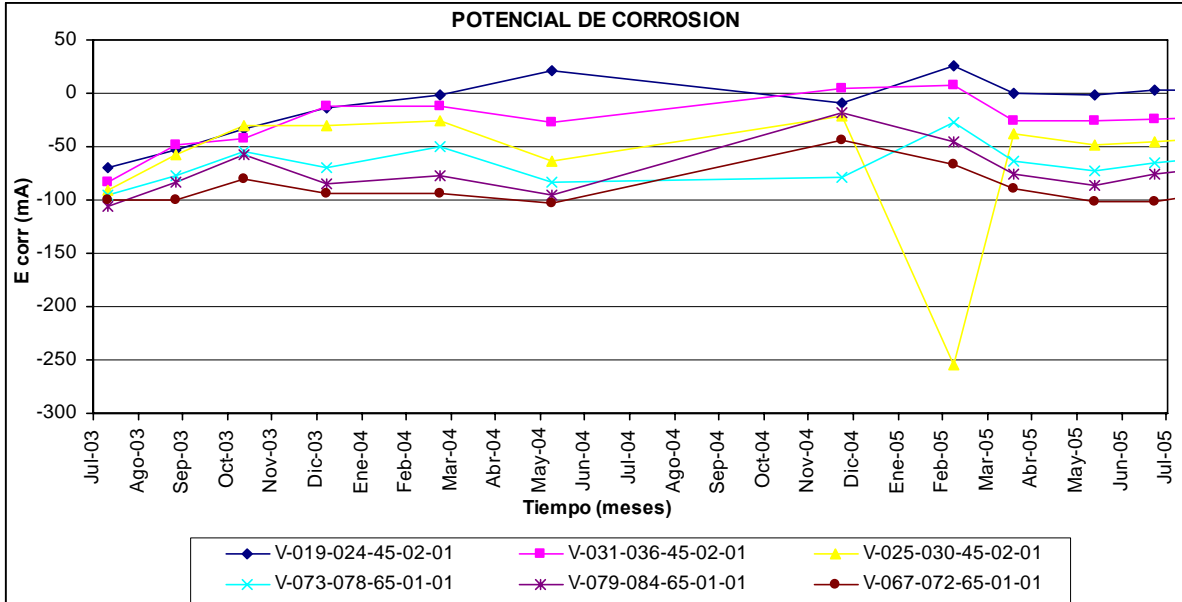
Gráfica. C. 46. Potencial de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx8) Querétaro.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación Querétaro (Mx8)

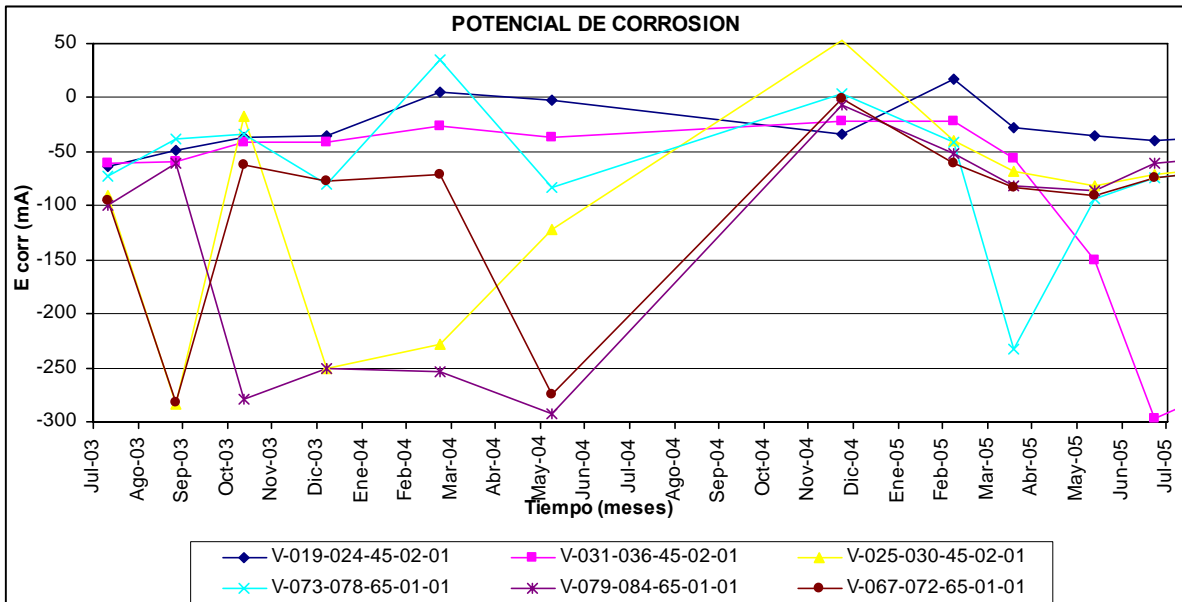
⇒ A 1.5 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 47. Potencial de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx8) Querétaro.

• **Cara Resguardada C2**



Gráfica. C. 48. Potencial de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx8) Querétaro.

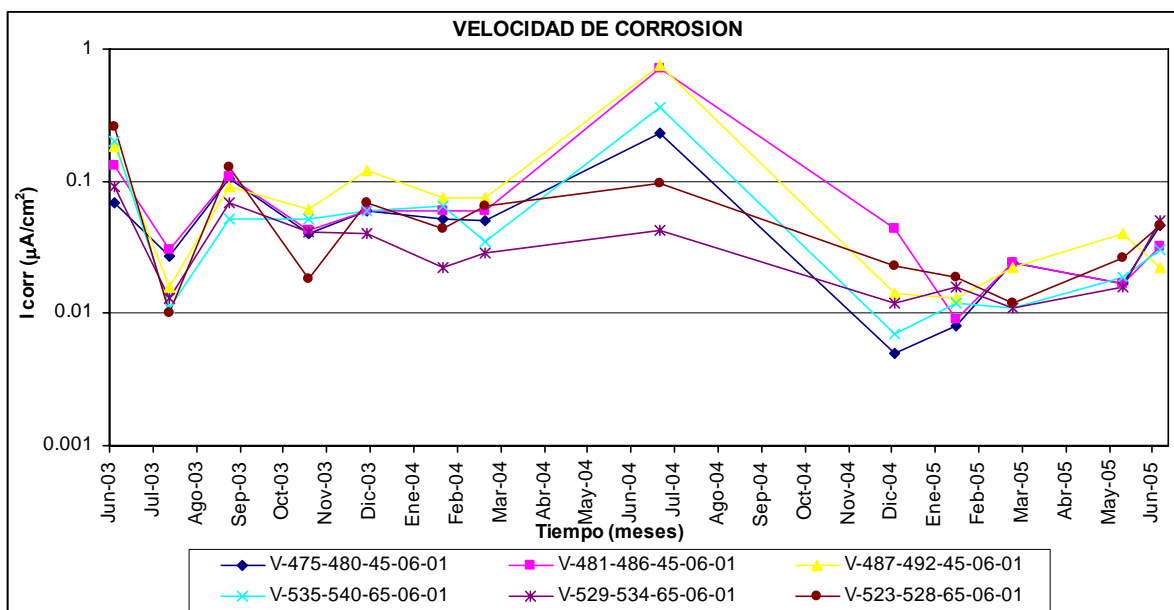
DATOS ELECTROQUIMICOS

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)]

Estación Toluca (Mx9)

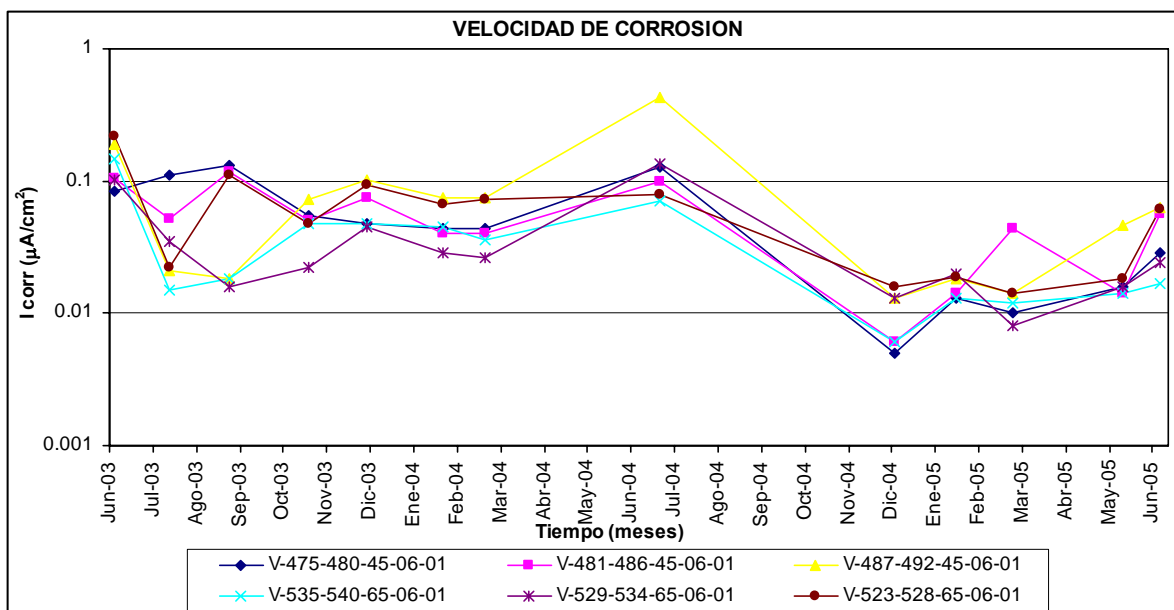
⇒ A 3.0 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 49. Velocidad de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx9) Toluca.

• **Cara Resguardada C2**



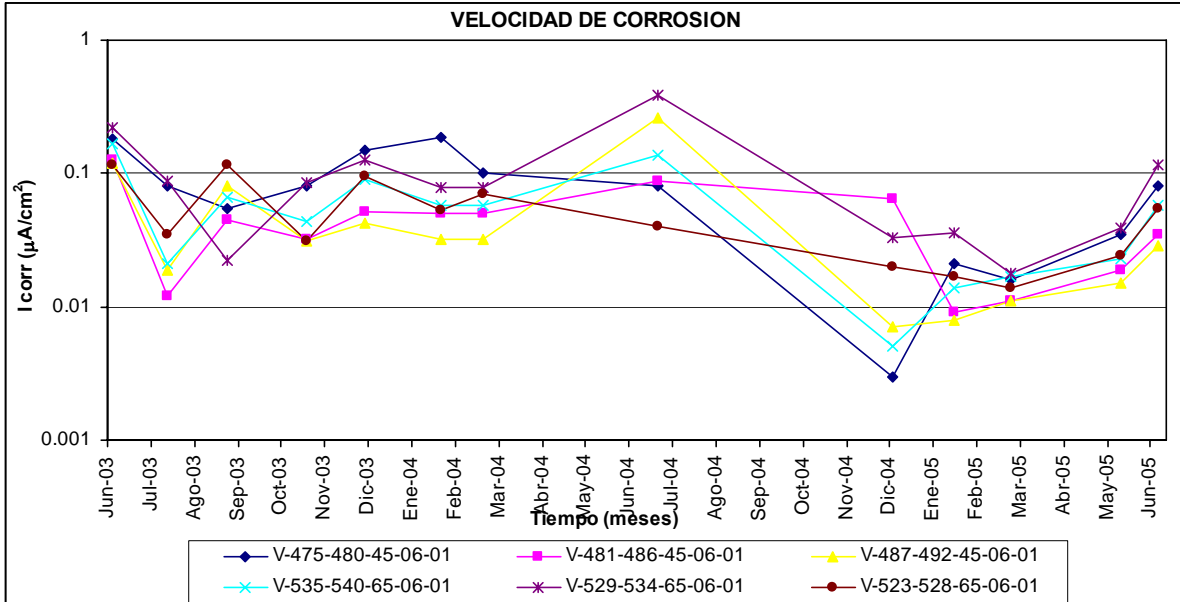
Gráfica. C. 50. Velocidad de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx9) Toluca.

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} ($\mu A/cm^2$)]

Estación Toluca (Mx9)

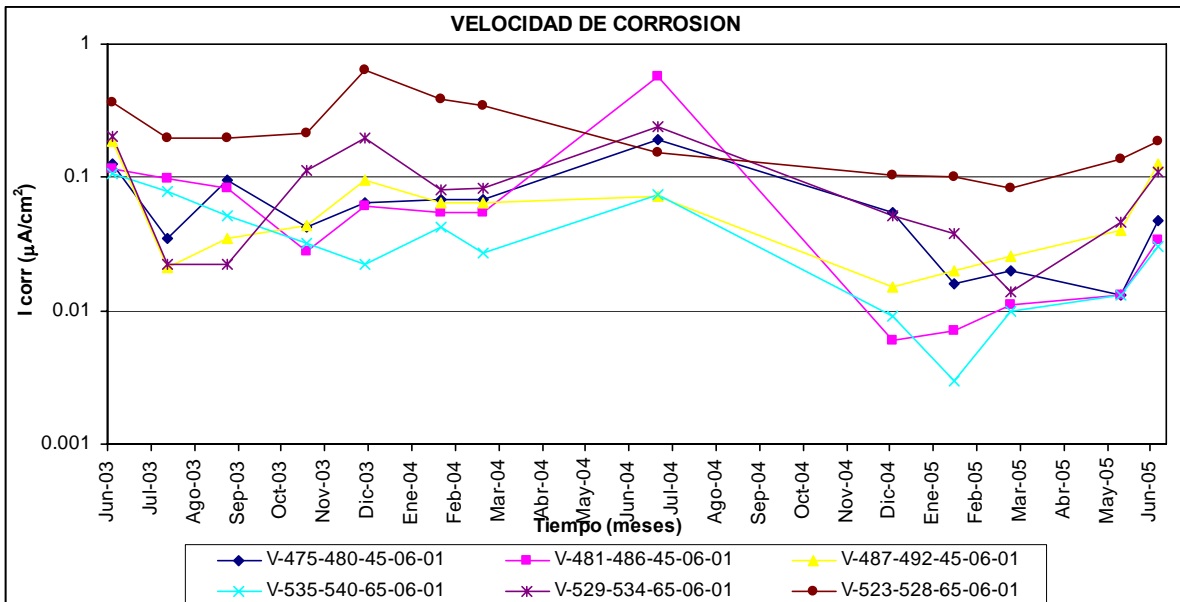
⇒ **A 2.0 cm de recubrimiento.**

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 51. Velocidad de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx9) Toluca.

• **Cara Resguardada C2**



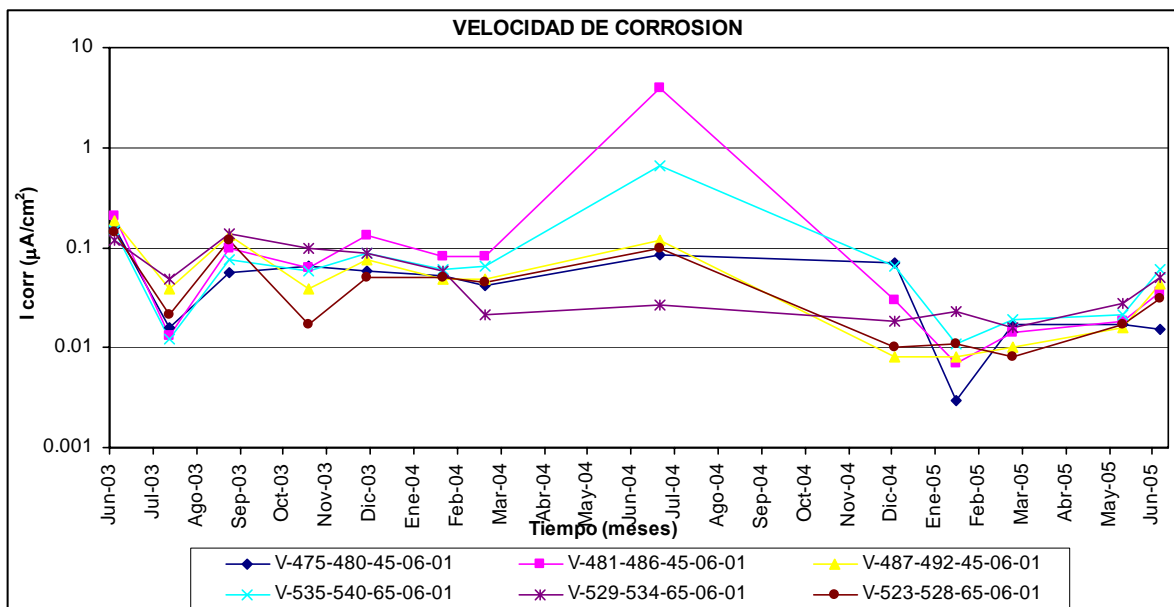
Gráfica. C. 52. Velocidad de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx9) Toluca.

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)]

Estación Toluca (Mx9)

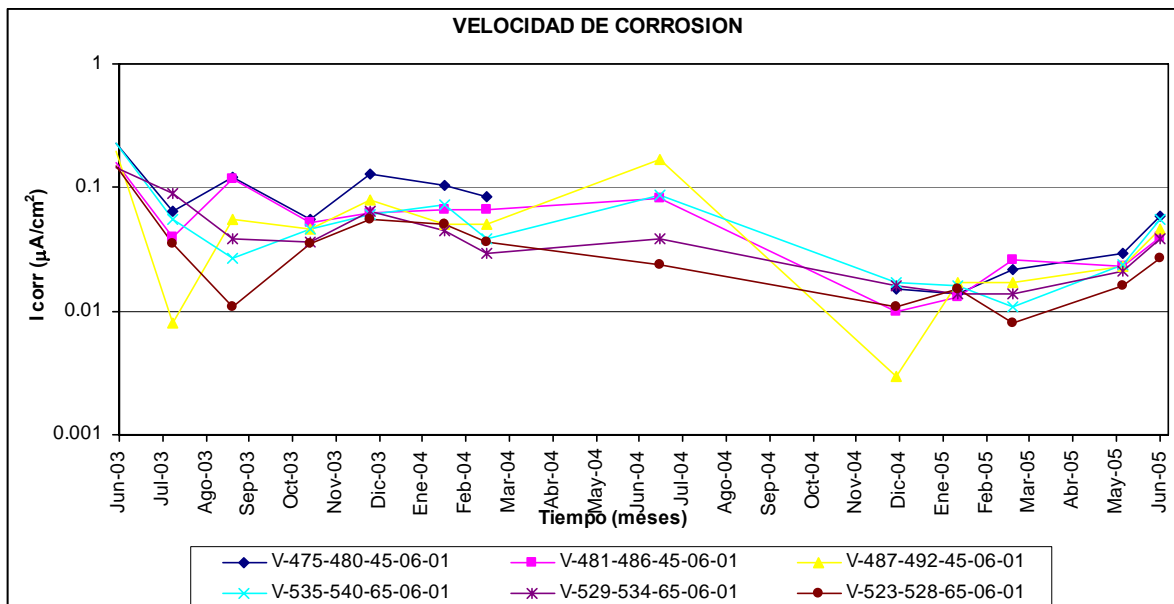
⇒ **A 1.5 cm de recubrimiento.**

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 53. Velocidad de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx9) Toluca.

• **Cara Resguardada C2**



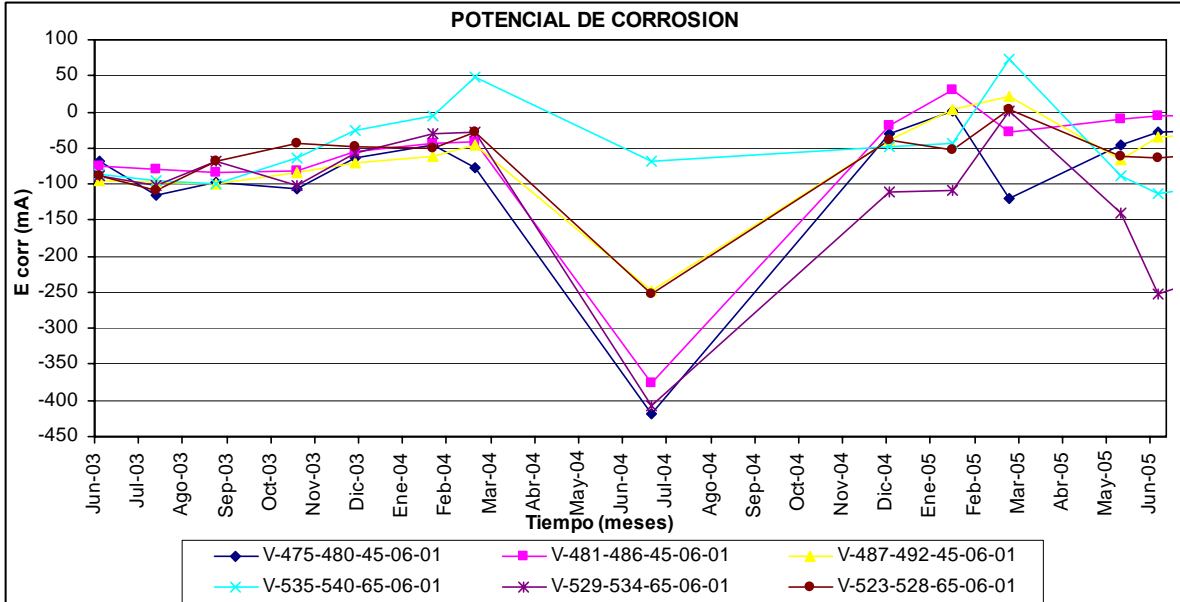
Gráfica. C. 54. Velocidad de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx9) Toluca.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación Toluca (Mx9)

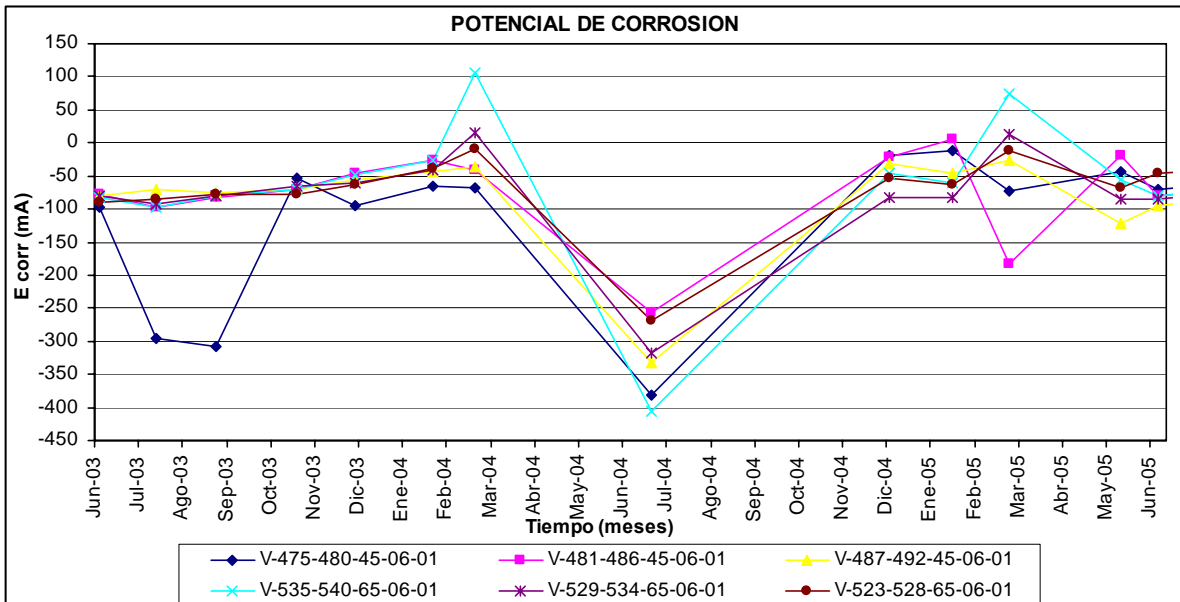
⇒ A 3.0 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 55. Potencial de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx9) Toluca.

• **Cara Resguardada C2**



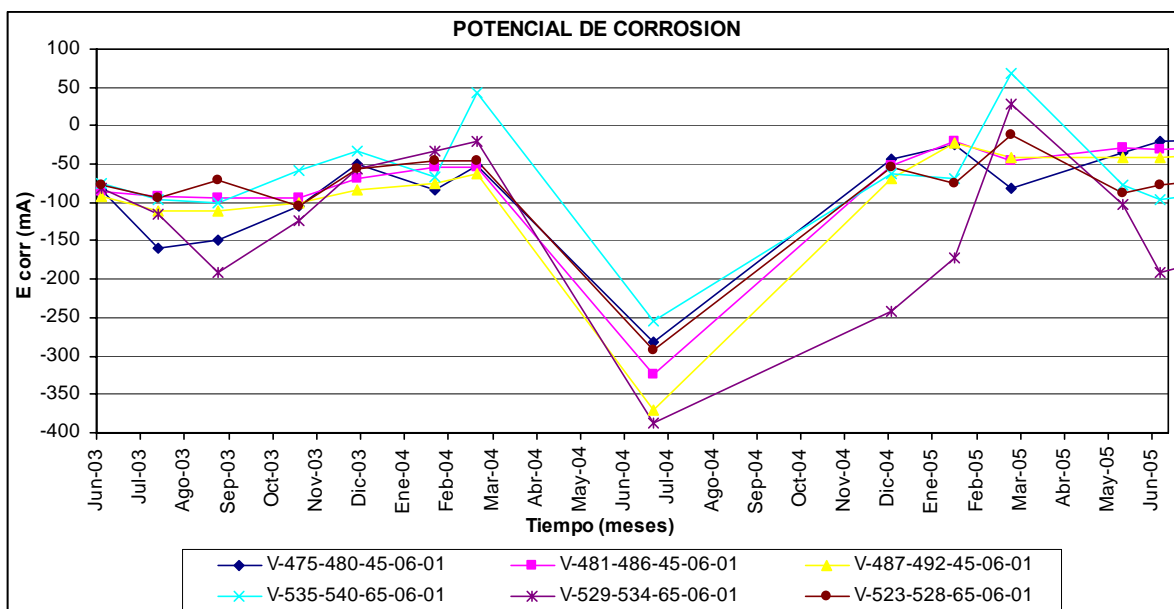
Gráfica. C. 56. Potencial de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx9) Toluca.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación Toluca (Mx9)

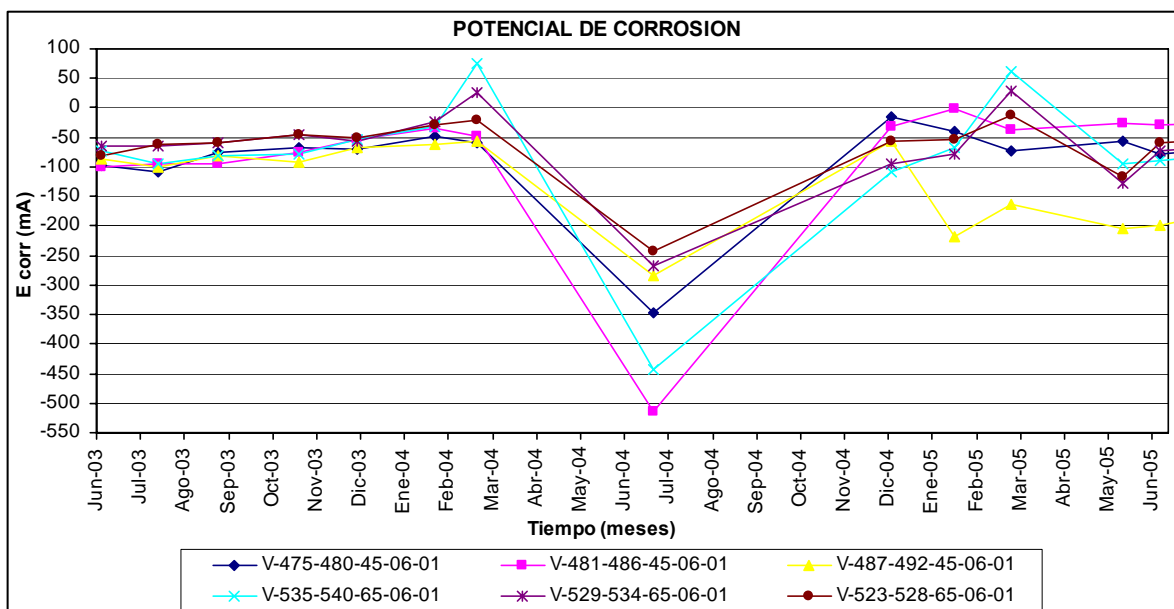
⇒ A 2.0 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 57. Potencial de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx9) Toluca.

• **Cara Resguardada C2**



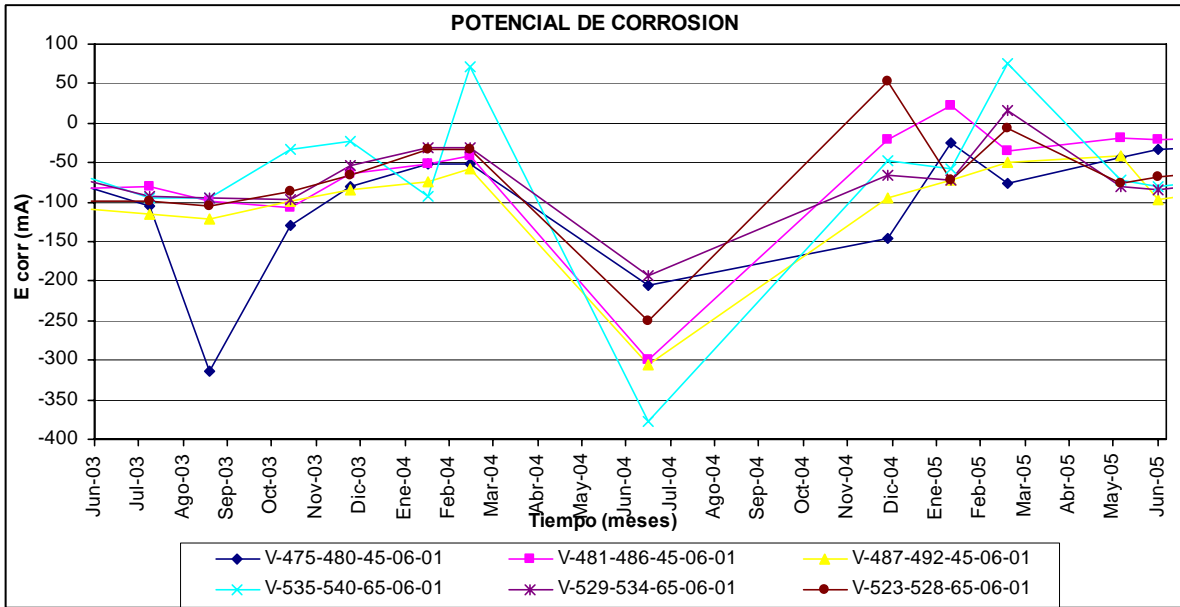
Gráfica. C. 58. Potencial de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx9) Toluca.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación Toluca (Mx9)

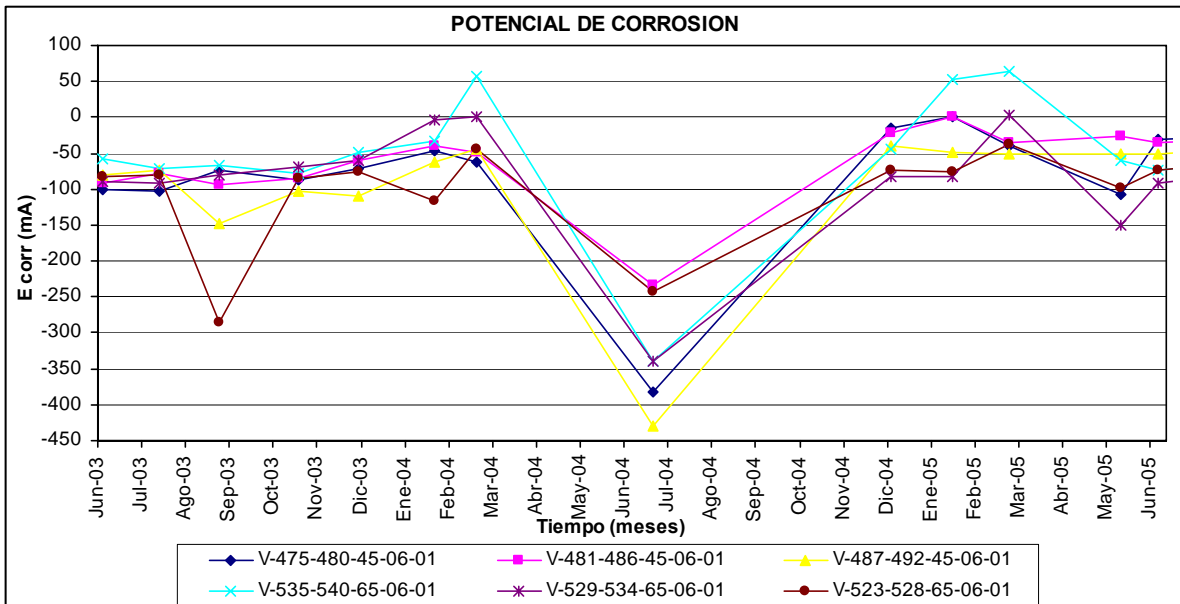
⇒ A 1.5 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 59. Potencial de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx9) Toluca.

• **Cara Resguardada C2**



Gráfica. C. 60. Potencial de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx9) Toluca.

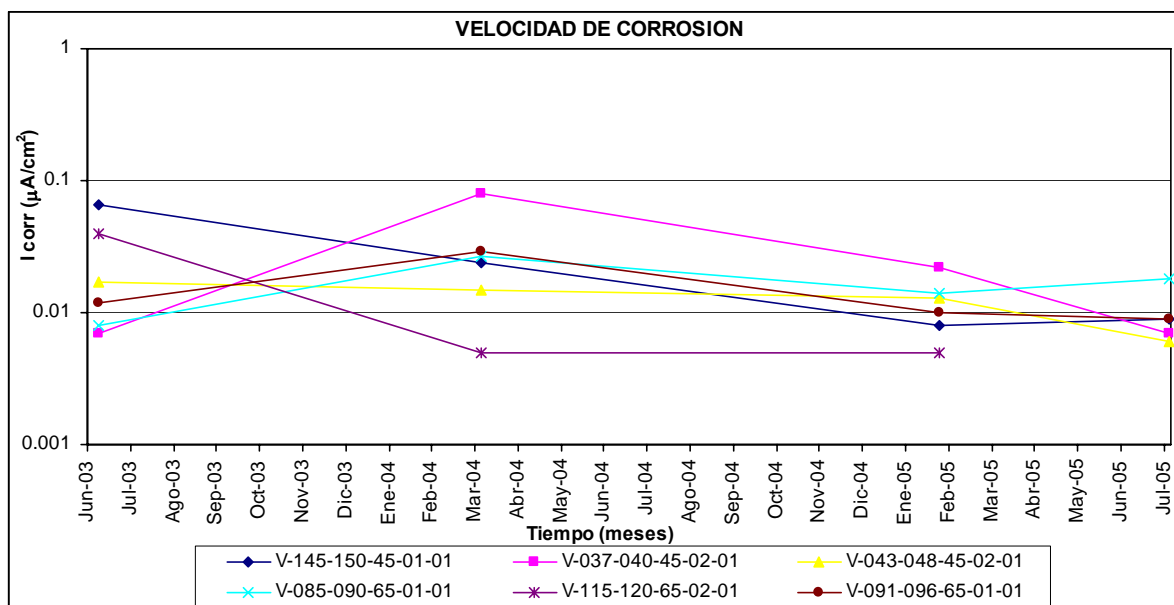
DATOS ELECTROQUIMICOS

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)]

Estación Mexicali (Mx10)

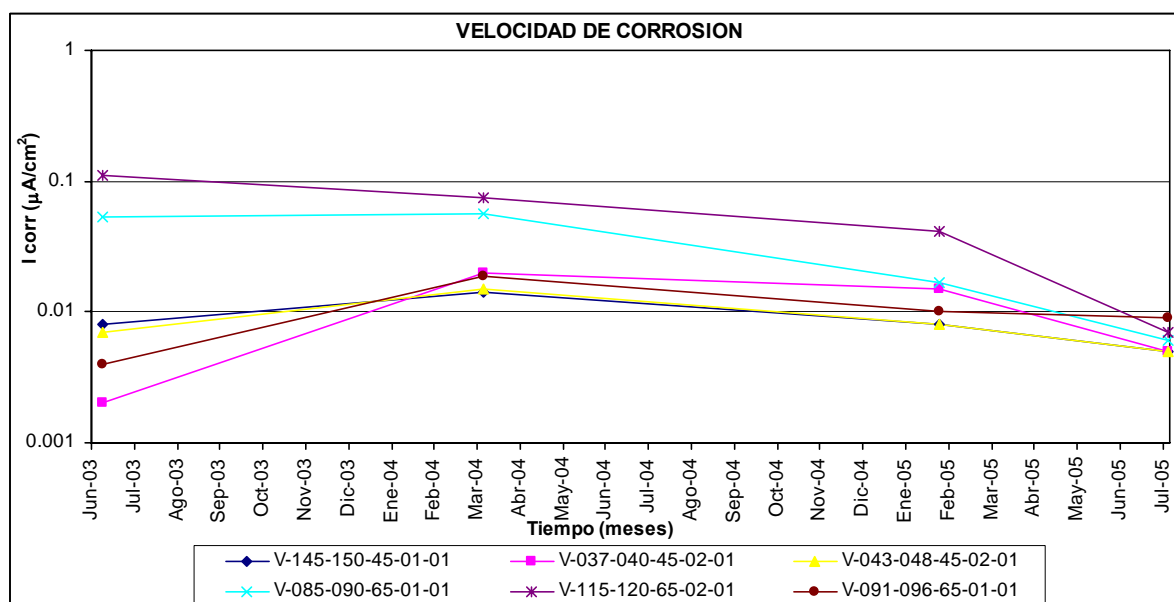
⇒ A 3.0 cm de recubrimiento.

• Cara Expuesta C1



Gráfica. C. 61. Velocidad de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx10) Mexicali.

• Cara Resguardada C2



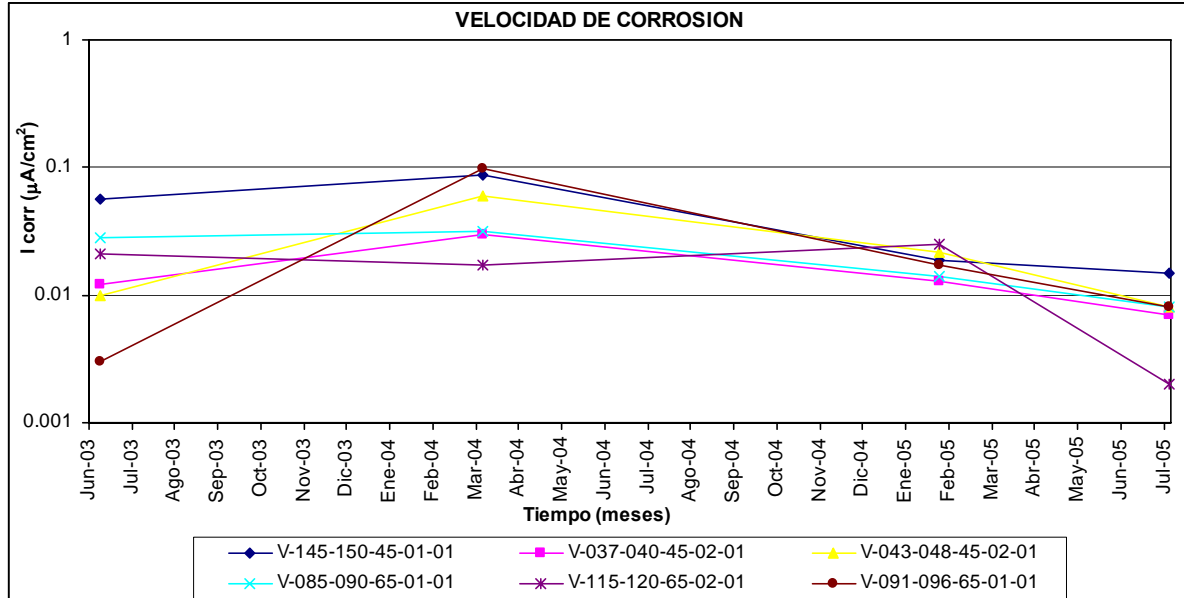
Gráfica. C. 62. Velocidad de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx10) Mexicali.

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)]

Estación Mexicali (Mx10)

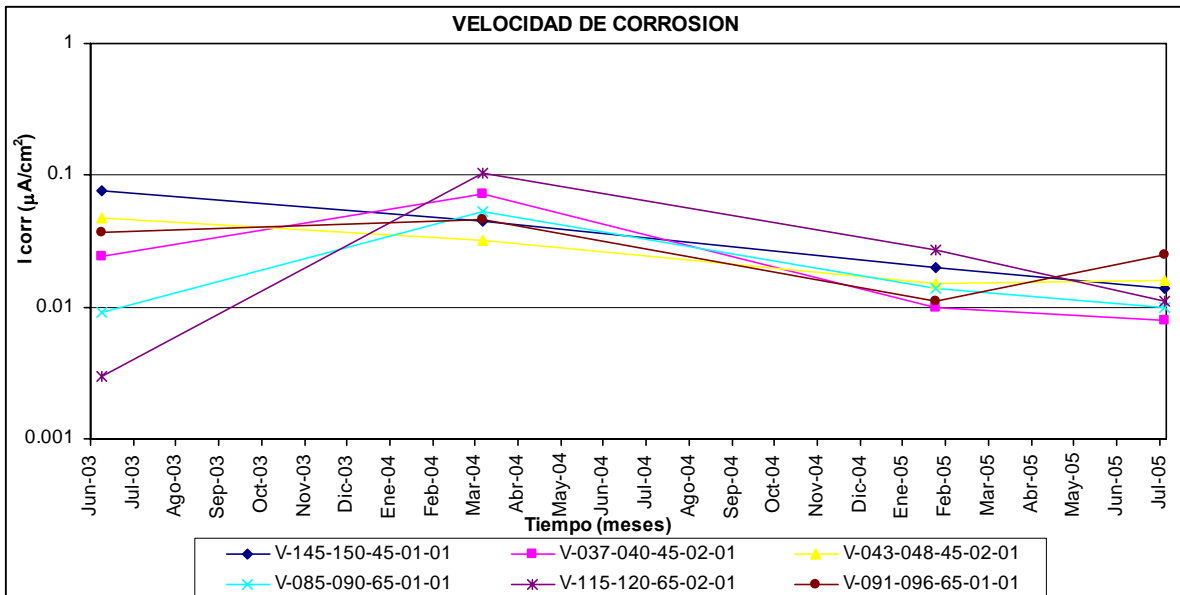
⇒ **A 2.0 cm de recubrimiento.**

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 63. Velocidad de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx10) Mexicali.

• **Cara Resguardada C2**



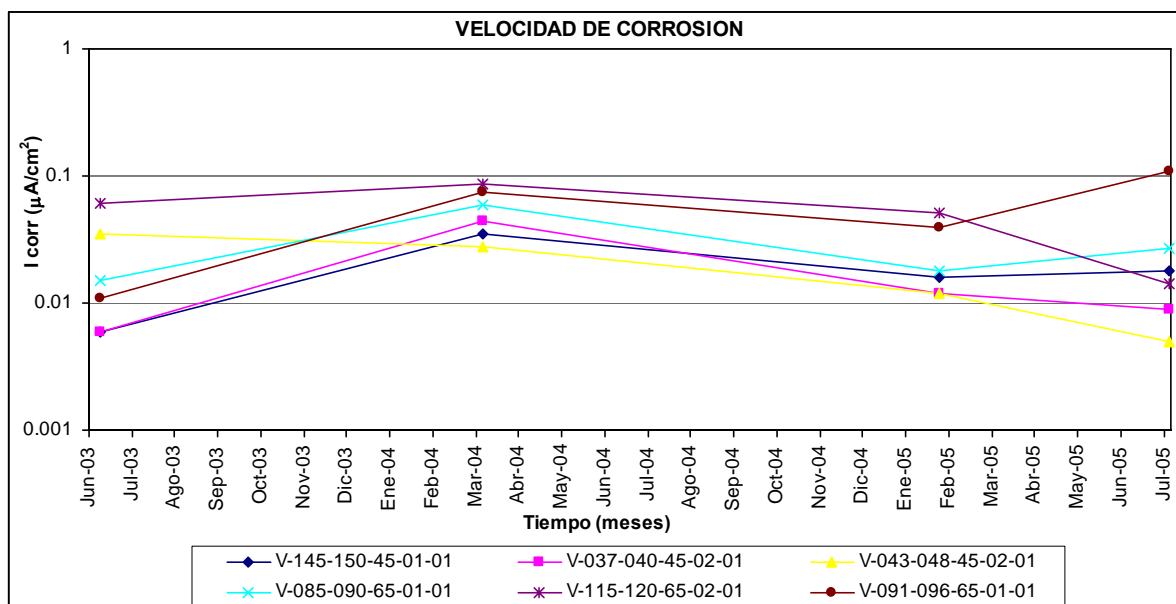
Gráfica. C. 64. Velocidad de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx10) Mexicali.

Velocidad de Corrosión. [I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)]

Estación Mexicali (Mx10)

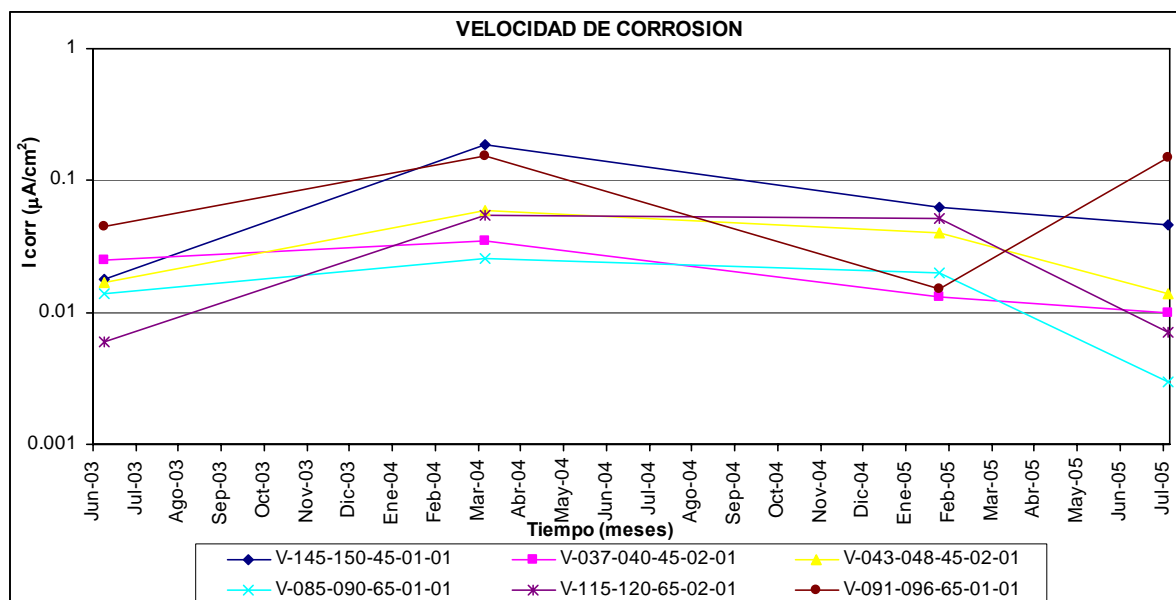
⇒ **A 1.5 cm de recubrimiento.**

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 65. Velocidad de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx10) Mexicali.

• **Cara Resguardada C2**



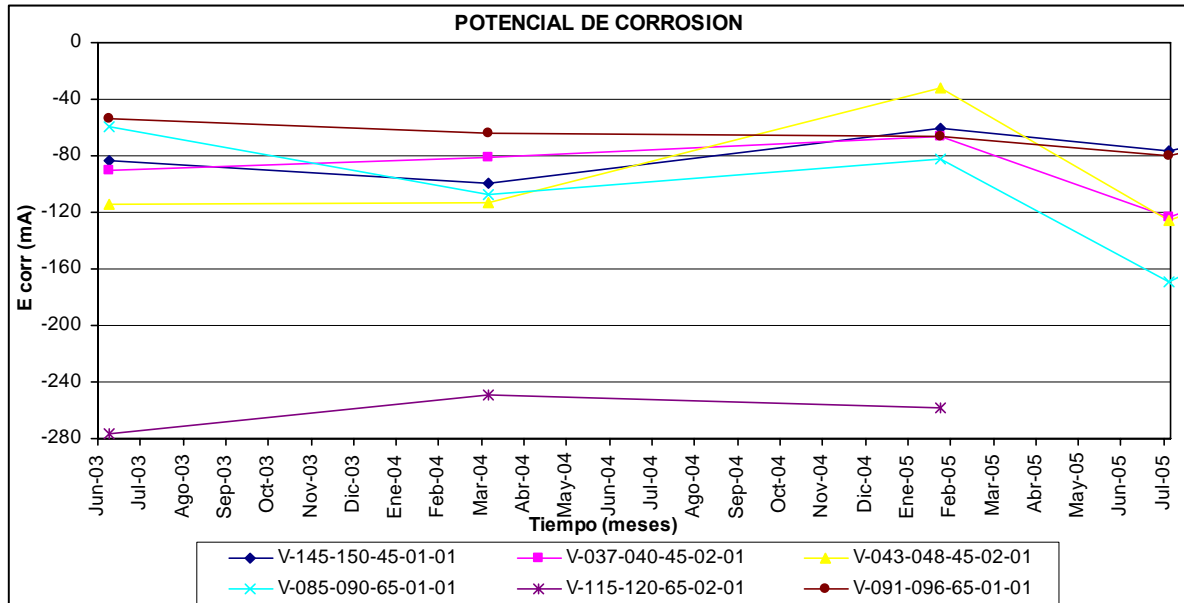
Gráfica. C. 66. Velocidad de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx10) Mexicali.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación Mexicali (Mx10)

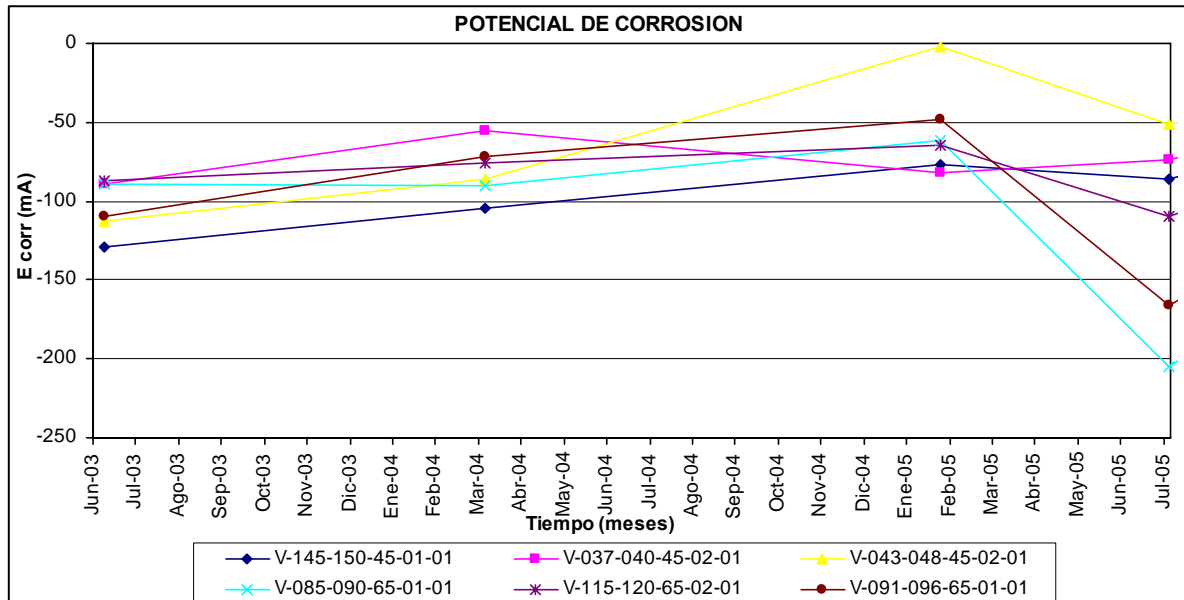
⇒ A 3.0 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 67. Potencial de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx10) Mexicali.

• **Cara Resguardada C2**



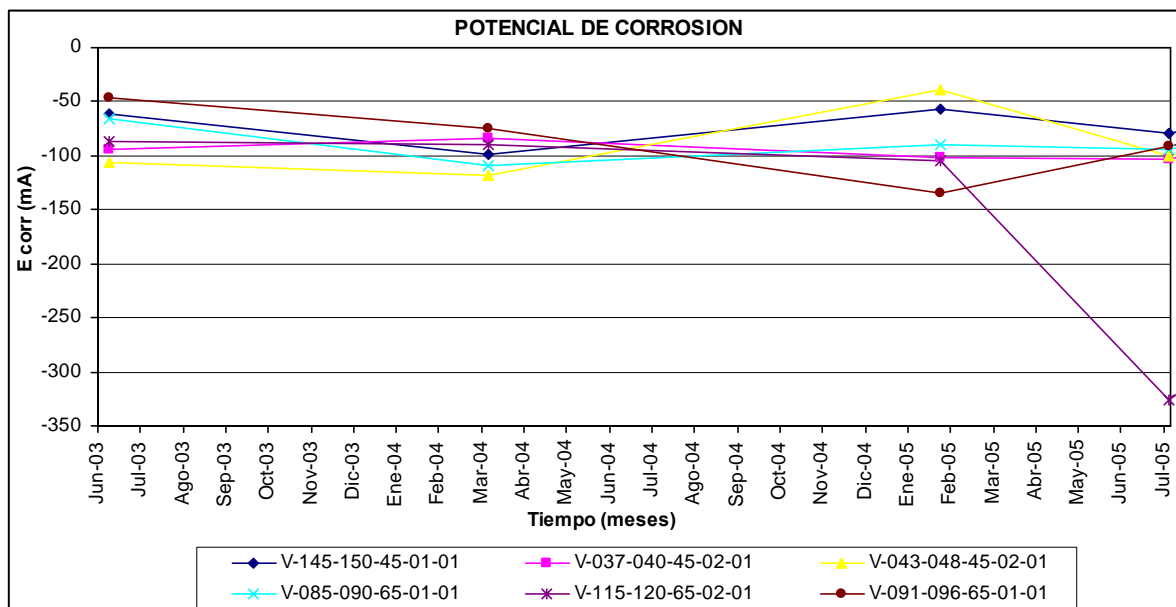
Gráfica. C. 68. Potencial de corrosión para las varillas con 3.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx10) Mexicali.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación Mexicali (Mx10)

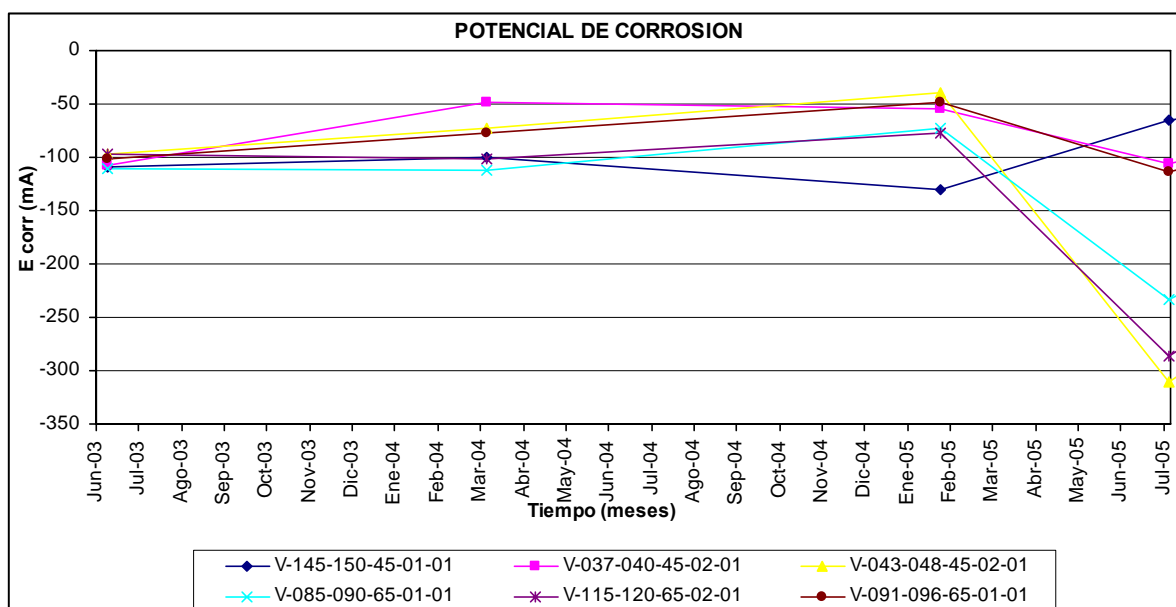
⇒ A 2.0 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 69. Potencial de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx10) Mexicali.

• **Cara Resguardada C2**



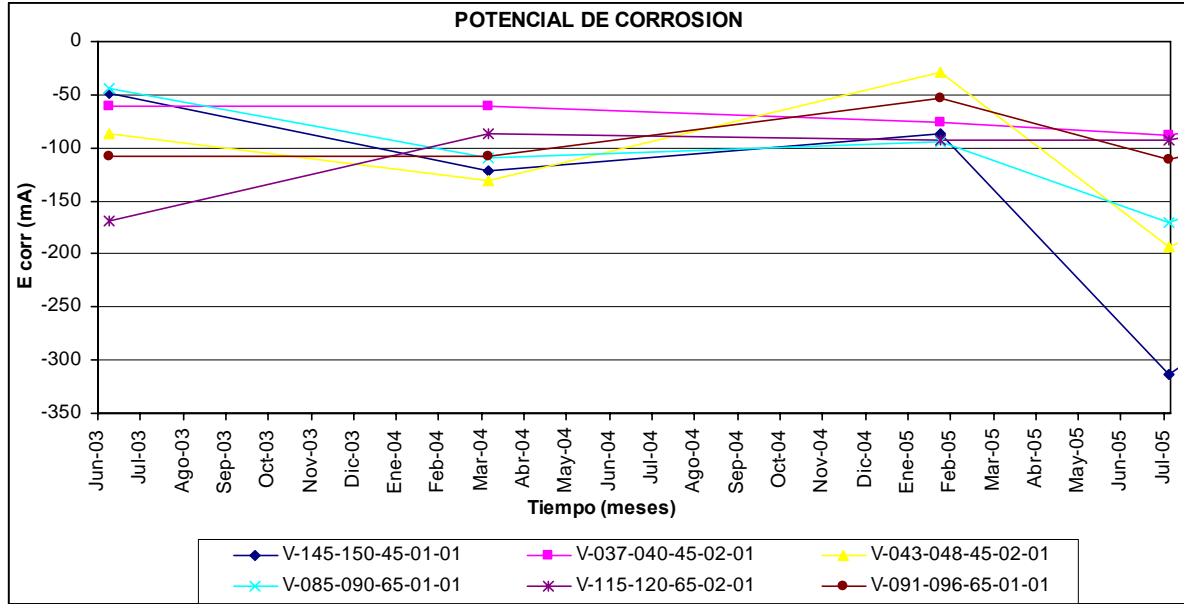
Gráfica. C. 70. Potencial de corrosión para las varillas con 2.0 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx10) Mexicali.

Potencial de Corrosión. [E_{corr} (mV)]

Estación Mexicali (Mx10)

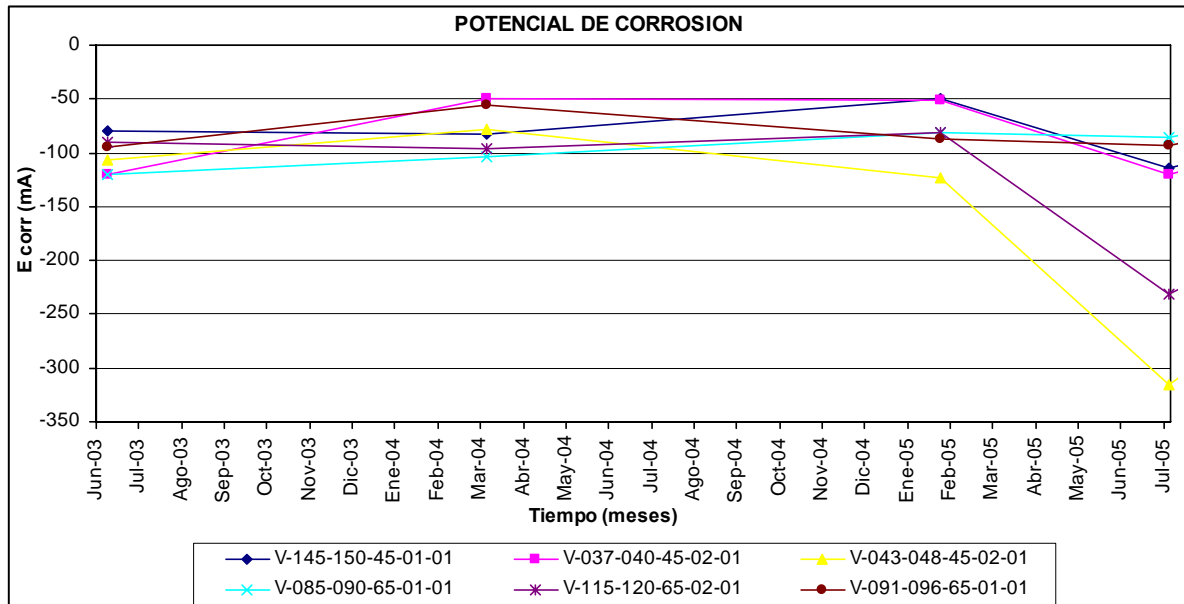
⇒ A 1.5 cm de recubrimiento.

• **Cara Expuesta C1**



Gráfica. C. 71. Potencial de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara expuesta C1 de la Estación (Mx10) Mexicali.

• **Cara Resguardada C2**

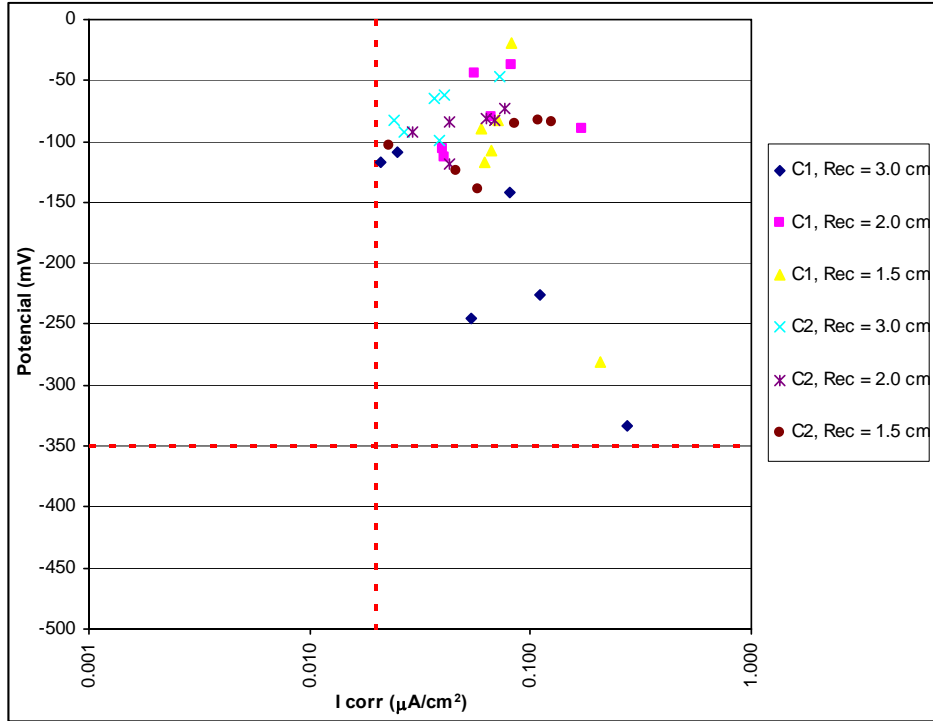


Gráfica. C. 72. Potencial de corrosión para las varillas con 1.5 cm de recubrimiento de la cara resguardada C2 de la Estación (Mx10) Mexicali.

ANEXO D

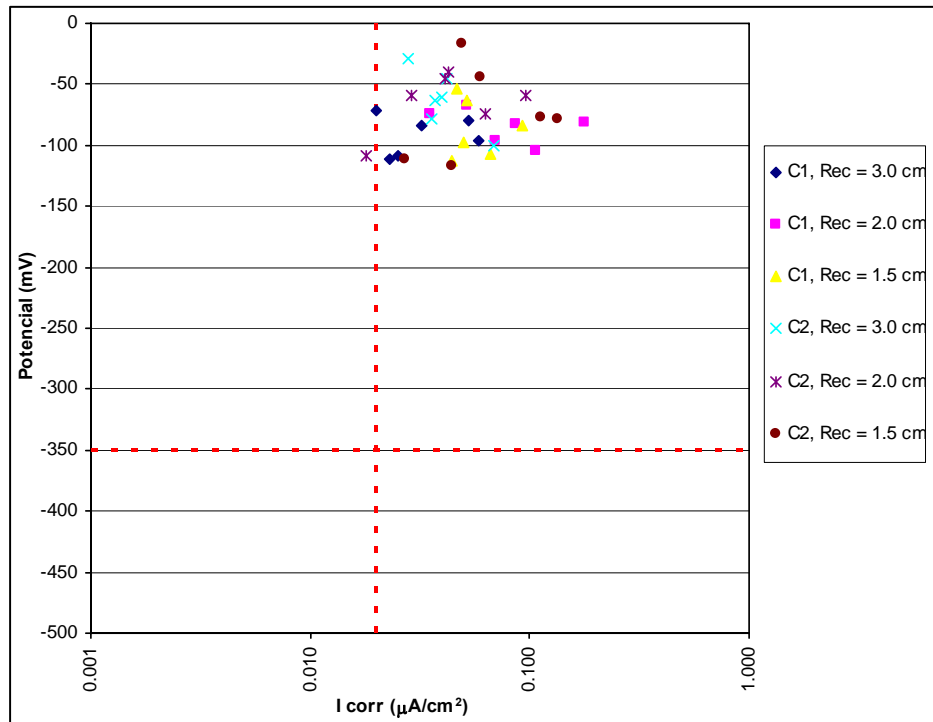
Número de Medición: 1
Fecha: 22/10/2003

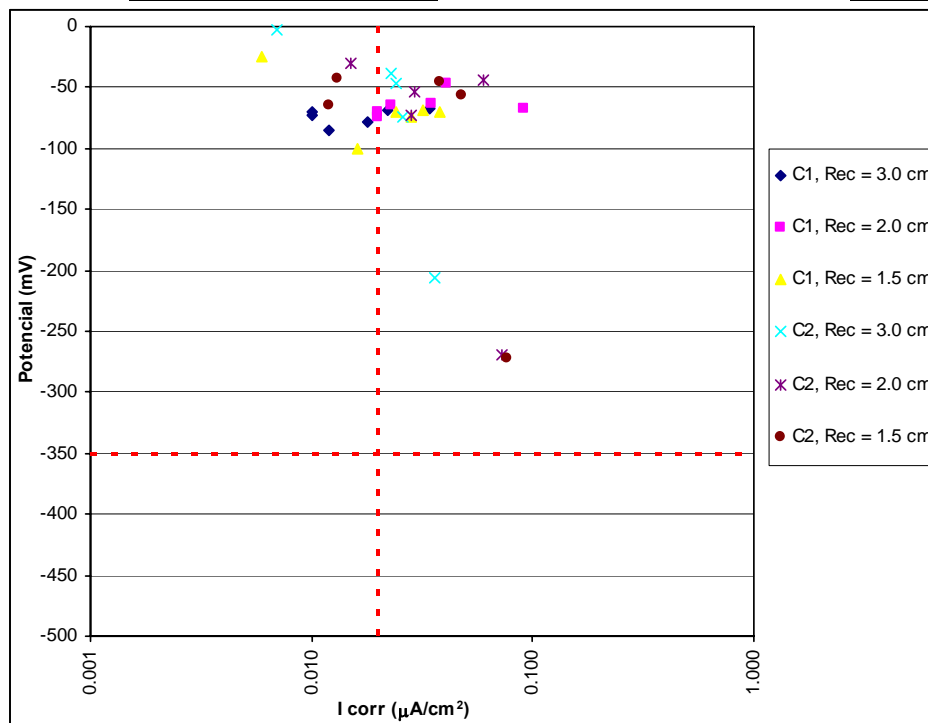
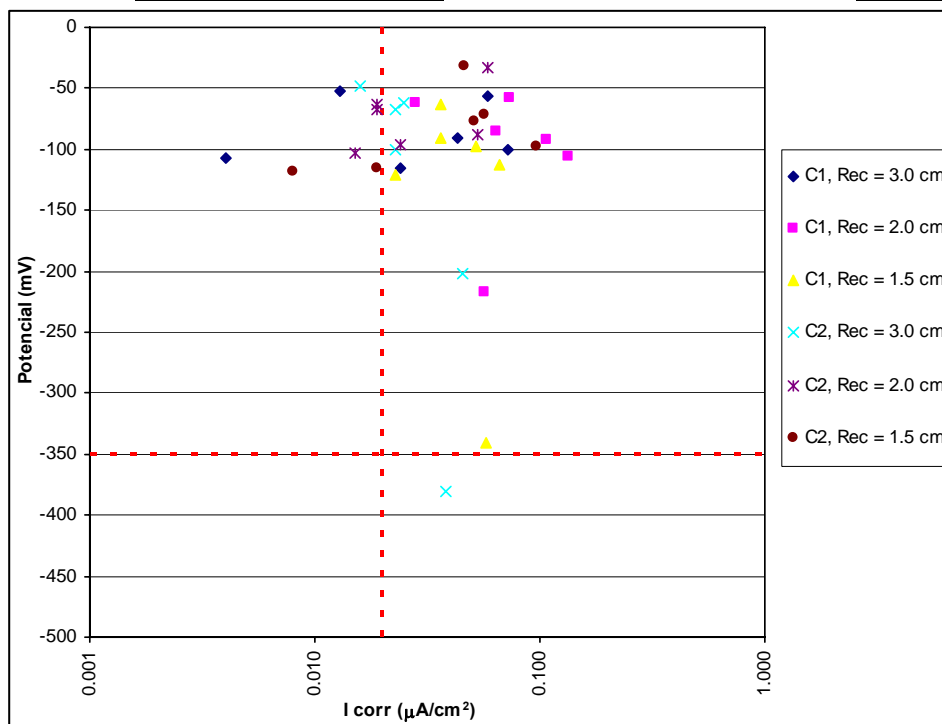
Estación: Morelia (Mx5)



Número de Medición: 2
Fecha: 28/01/2004

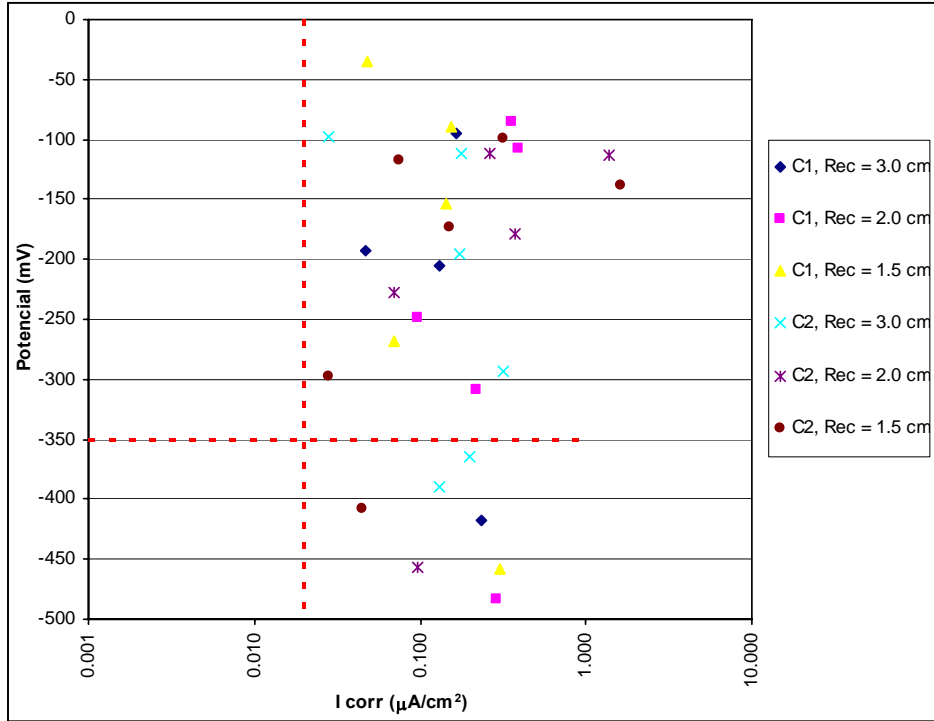
Estación: Morelia (Mx5)



Número de Medición: 3Fecha: 24/02/2004Estación: Morelia (Mx5)Número de Medición: 4Fecha: 27/05/2004Estación: Morelia (Mx5)

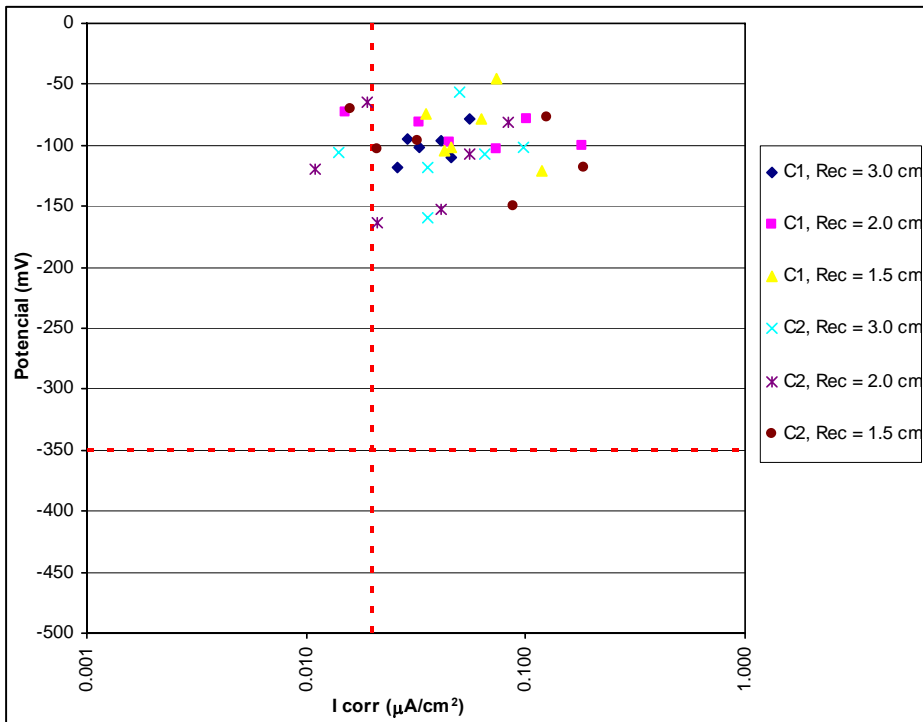
Número de Medición: 5
 Fecha: 28/06/2004

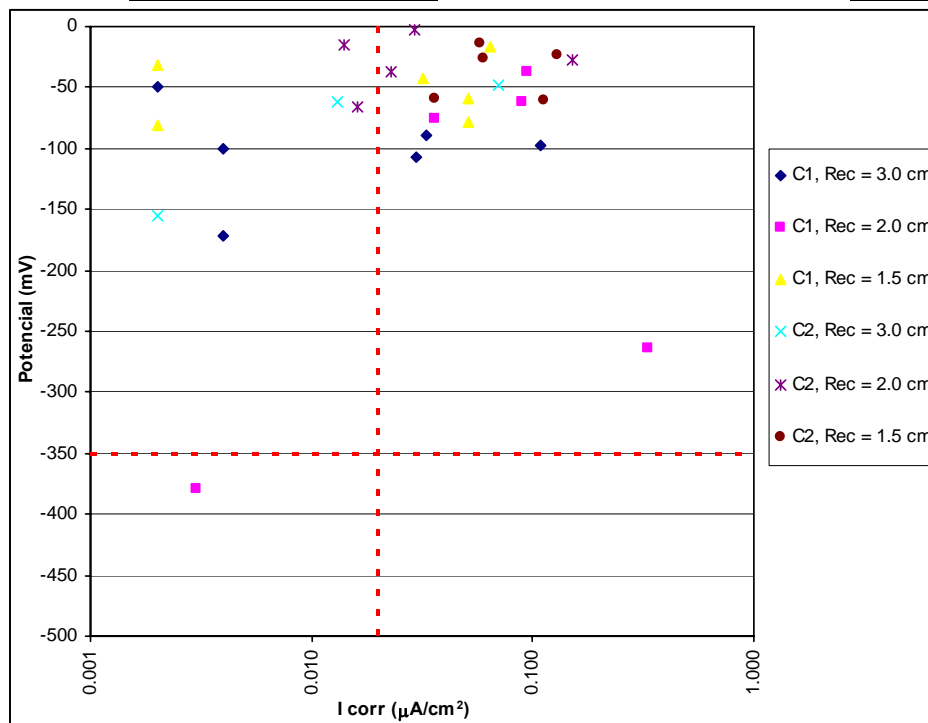
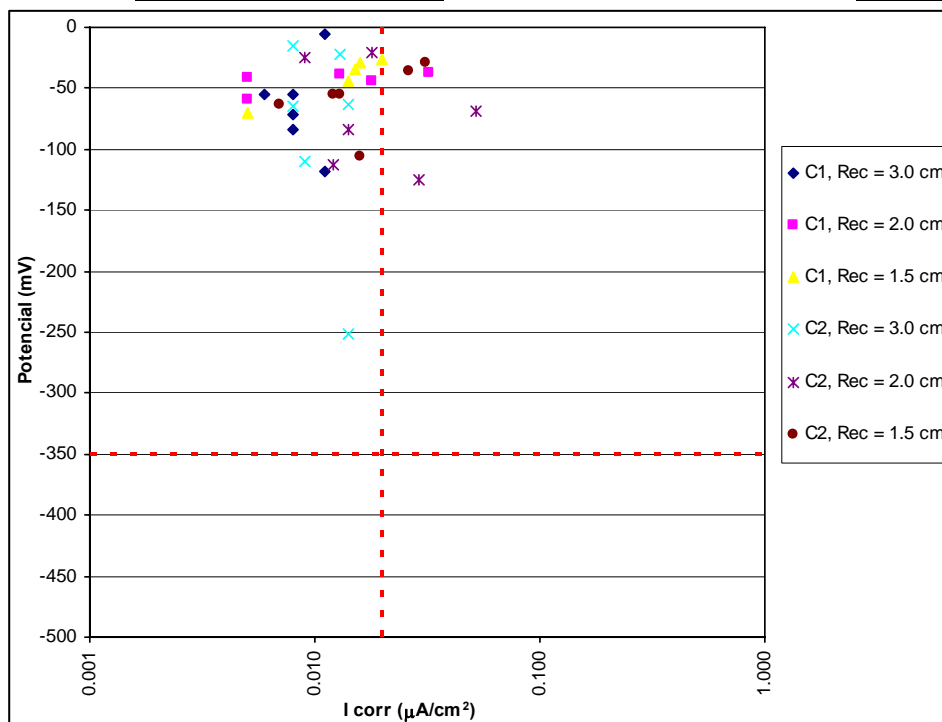
Estación: Morelia (Mx5)



Número de Medición: 6
 Fecha: 29/07/2004

Estación: Morelia (Mx5)

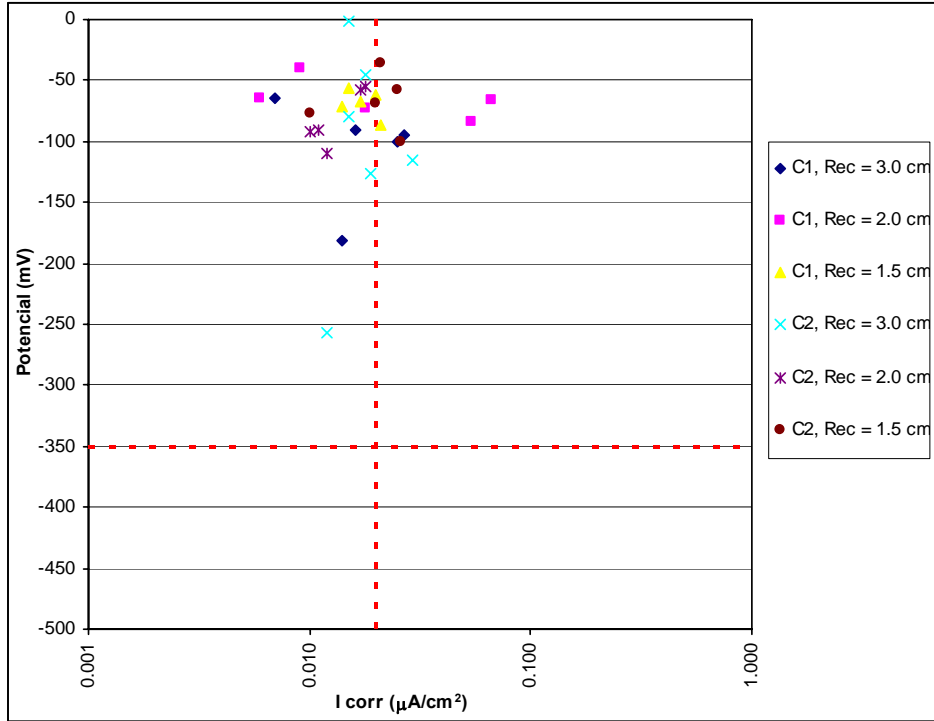


Número de Medición: 7Fecha: 26/11/2004Estación: Morelia (Mx5)Número de Medición: 8Fecha: 20/12/2004Estación: Morelia (Mx5)

Número de Medición: 9

Fecha: 01/02/2005

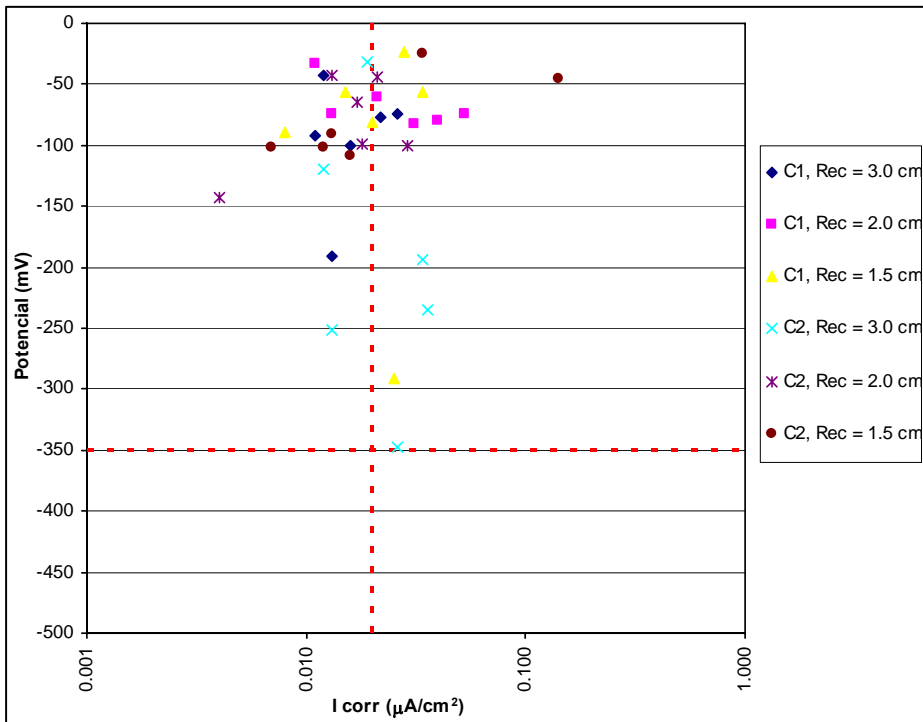
Estación: Morelia (Mx5)

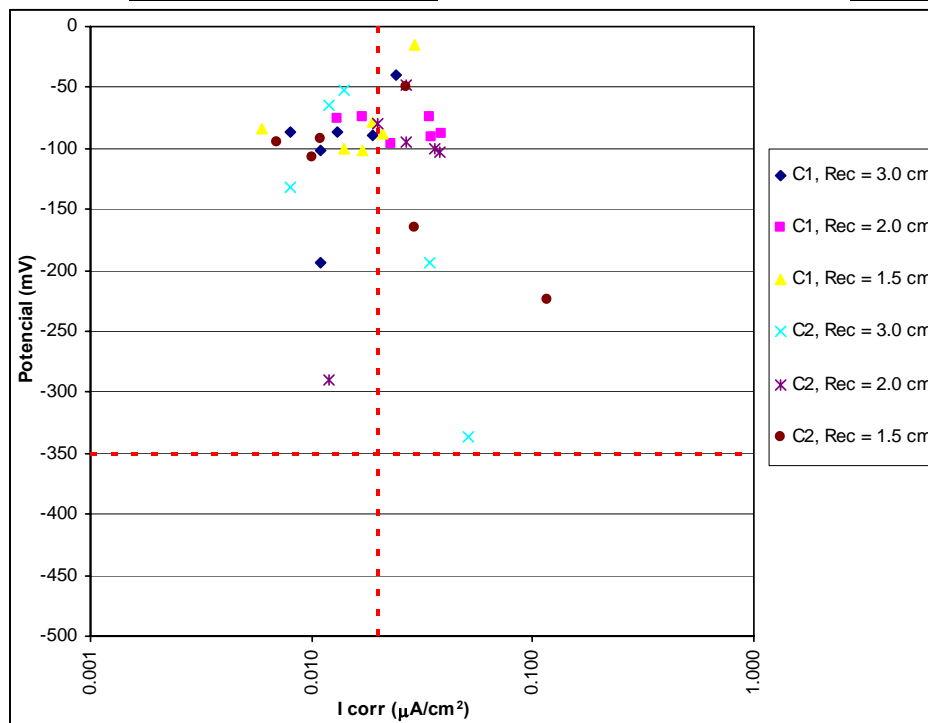
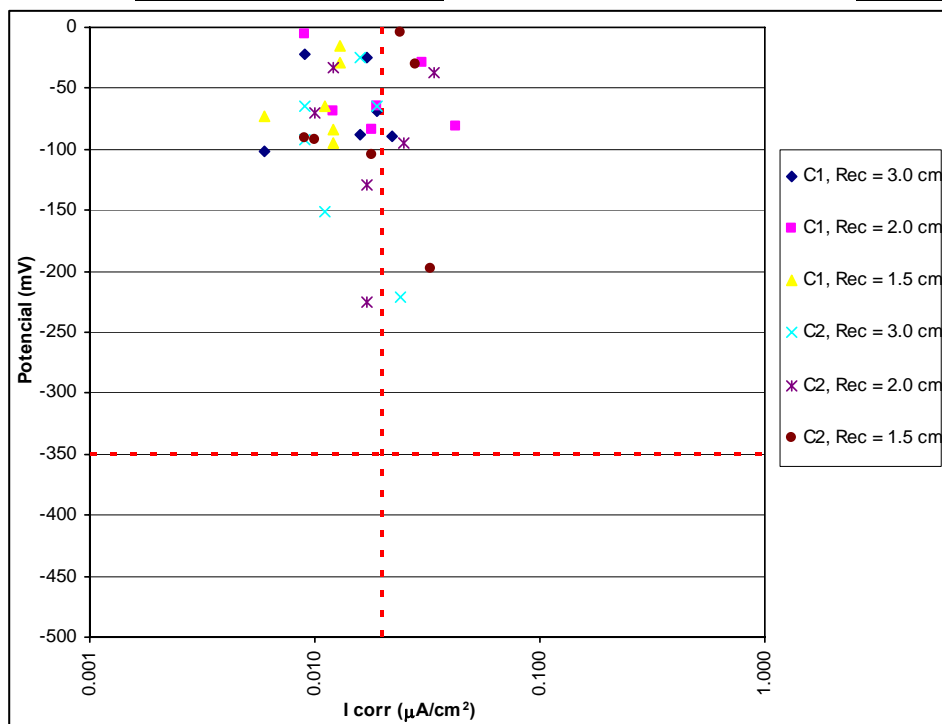


Número de Medición: 10

Fecha: 08/03/2005

Estación: Morelia (Mx5)

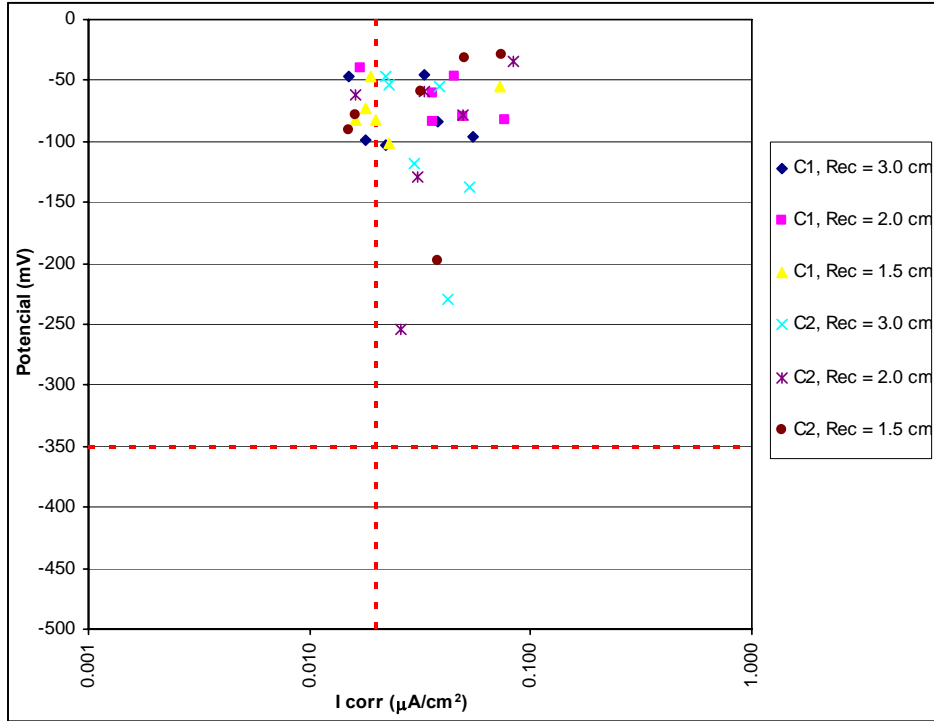


Número de Medición: 11Fecha: 03/05/2005Estación: Morelia (Mx5)Número de Medición: 12Fecha: 25/05/2005Estación: Morelia (Mx5)

Número de Medición: 13

Fecha: 22/06/2005

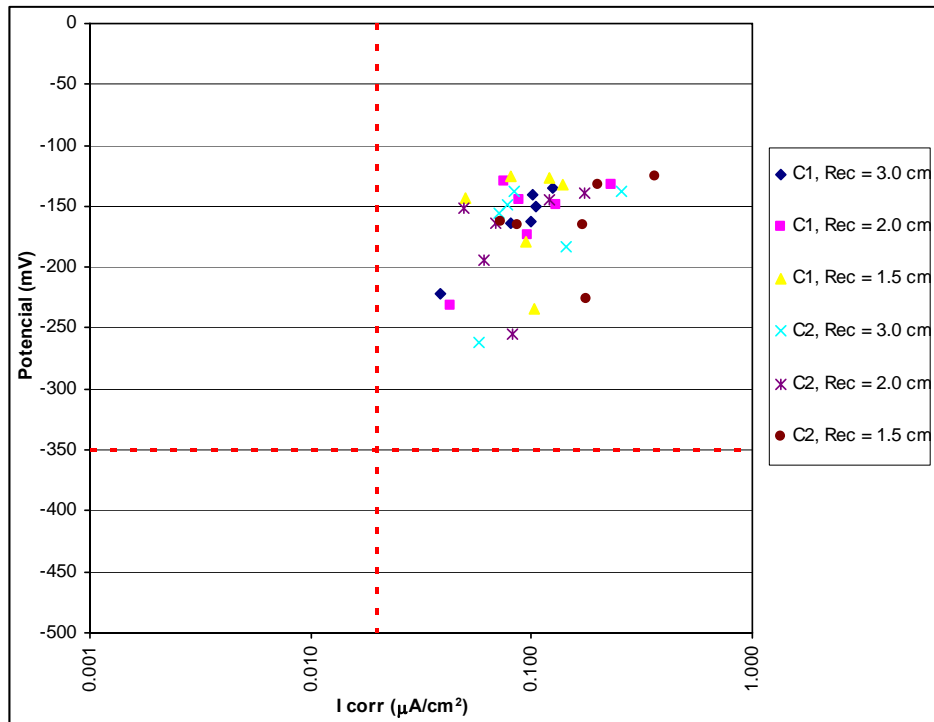
Estación: Morelia (Mx5)

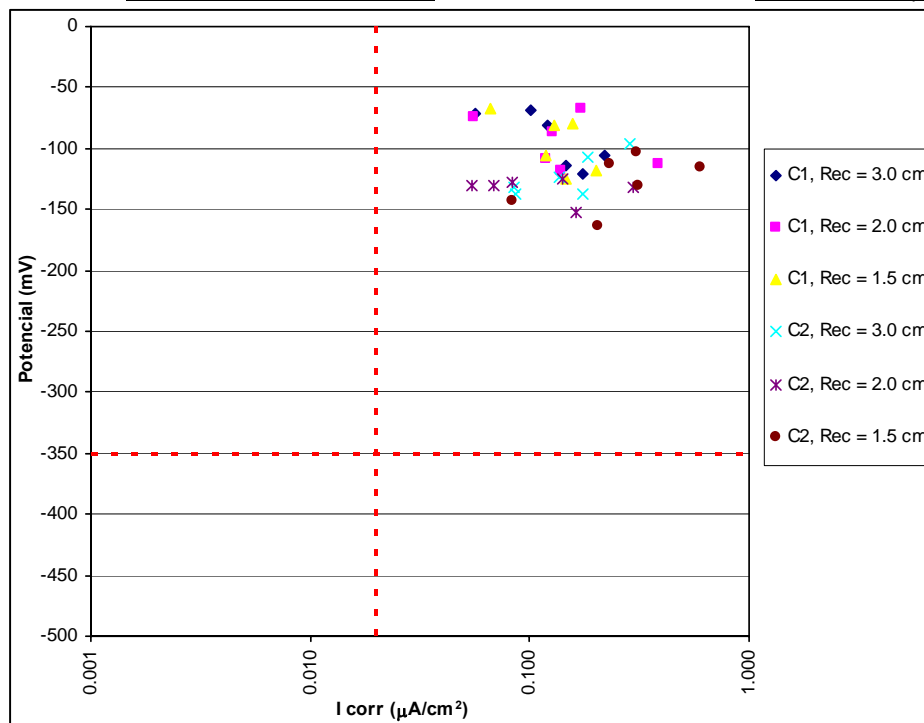
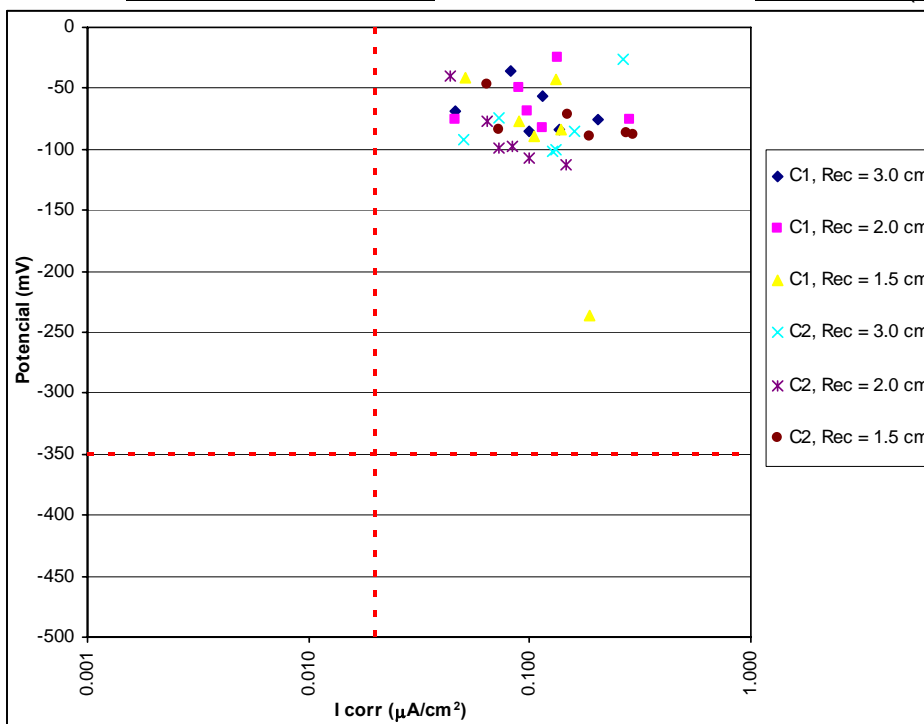


Número de Medición: 1

Fecha: 26/06/2003

Estación: Veracruz (Mx6)

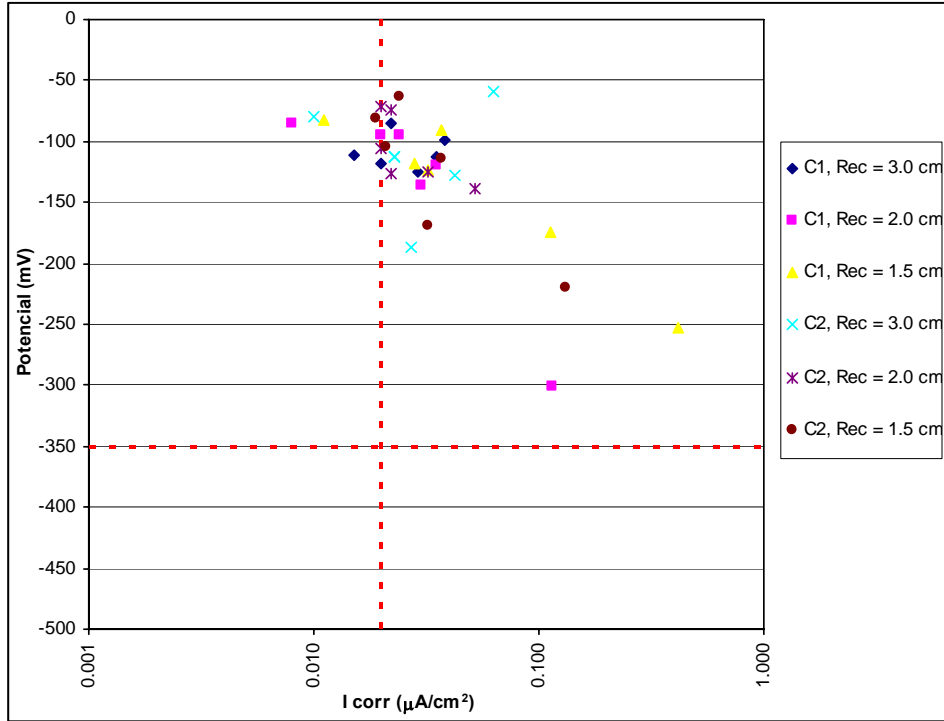


Número de Medición: 2Fecha: 31/07/2003Estación: Veracruz (Mx6)Número de Medición: 3Fecha: 16/10/2003Estación: Veracruz (Mx6)

Número de Medición: 4

Fecha: 01/12/2004

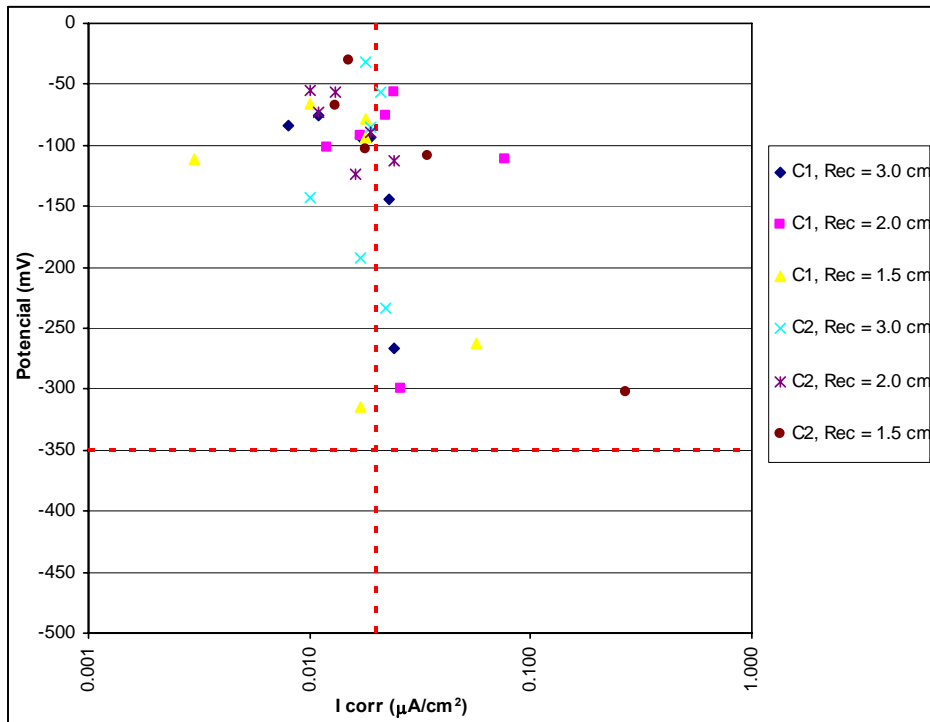
Estación: Veracruz (Mx6)



Número de Medición: 5

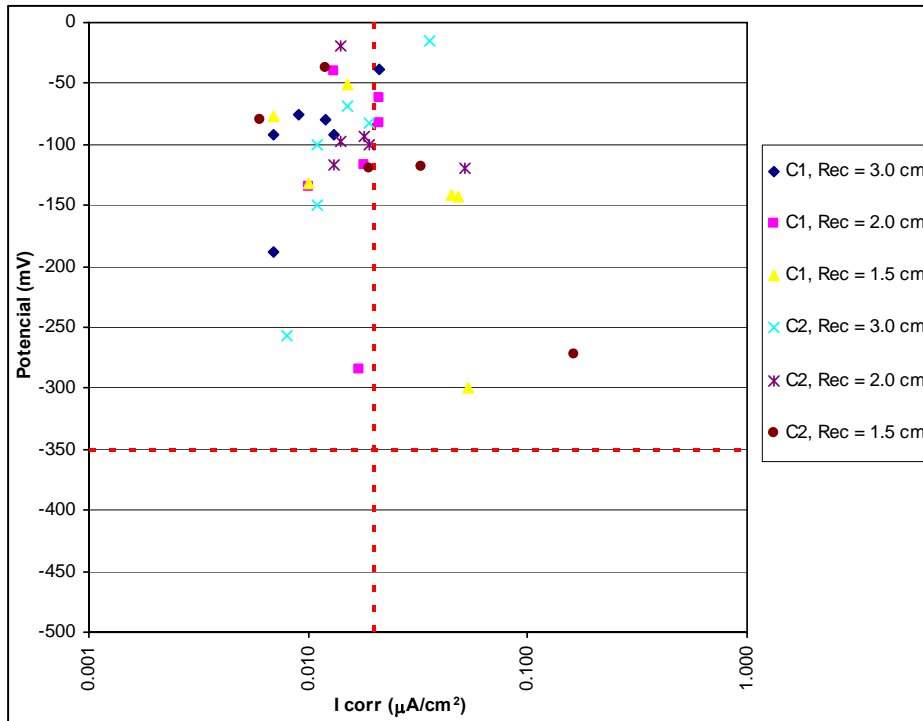
Fecha: 17/02/2005

Estación: Veracruz (Mx6)



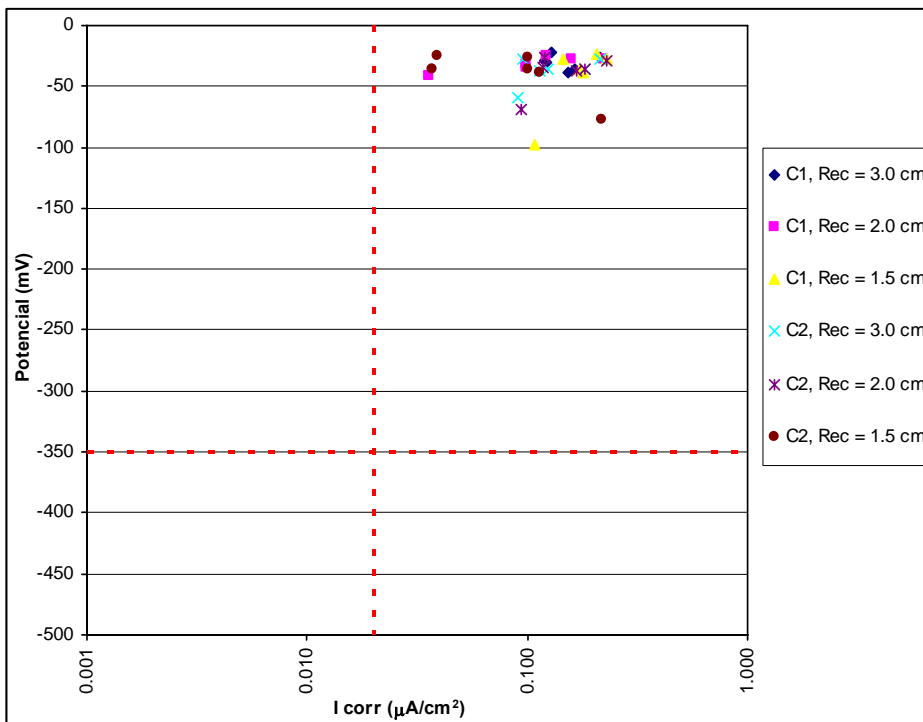
Número de Medición: 6
 Fecha: 16/05/2005

Estación: Veracruz (Mx6)



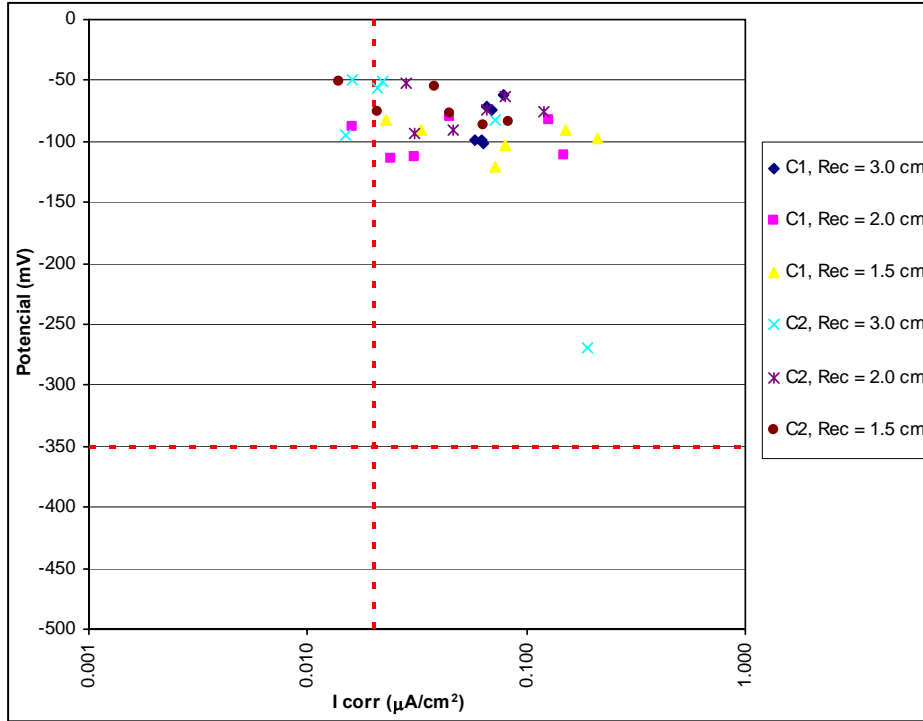
Número de Medición: 1
 Fecha: 20/06/2003

Estación: México,D.F. (Mx7)



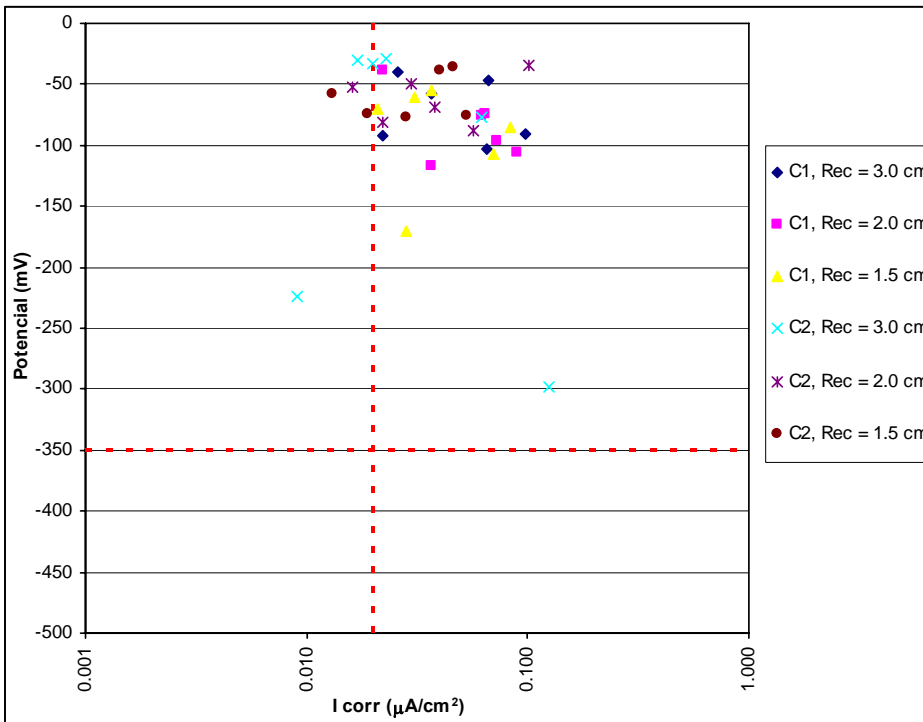
Número de Medición: 2
Fecha: 17/07/2003

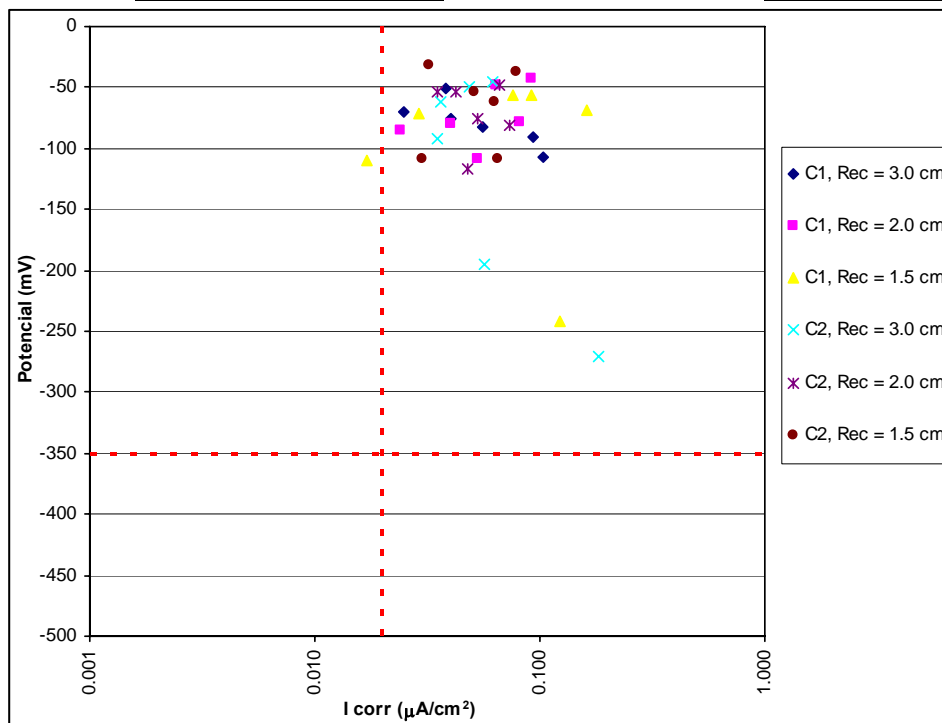
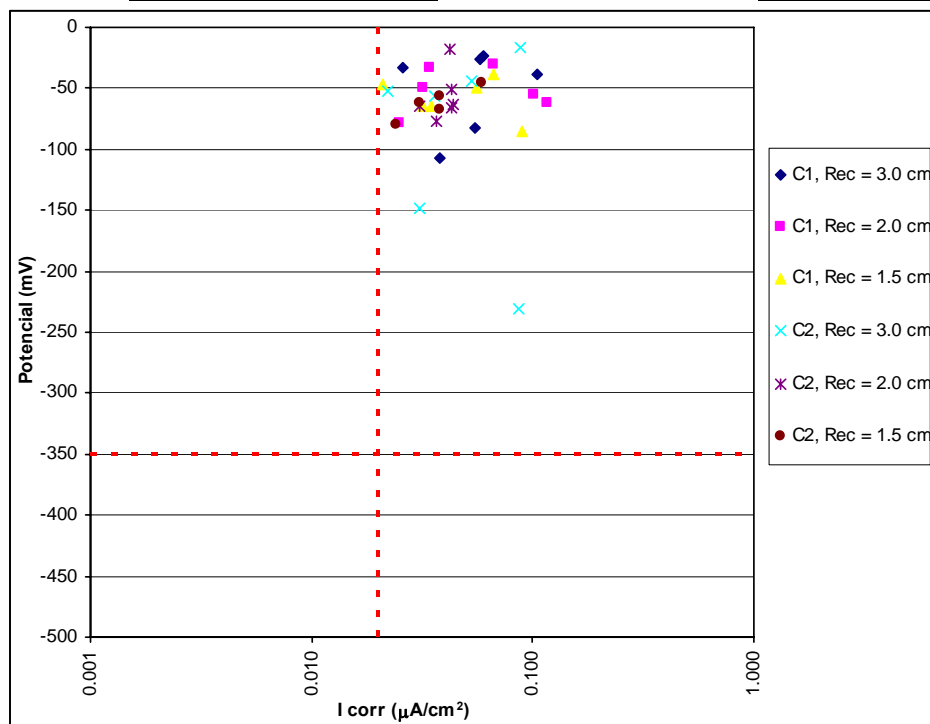
Estación: México,D.F. (Mx7)



Número de Medición: 3
Fecha: 27/08/2003

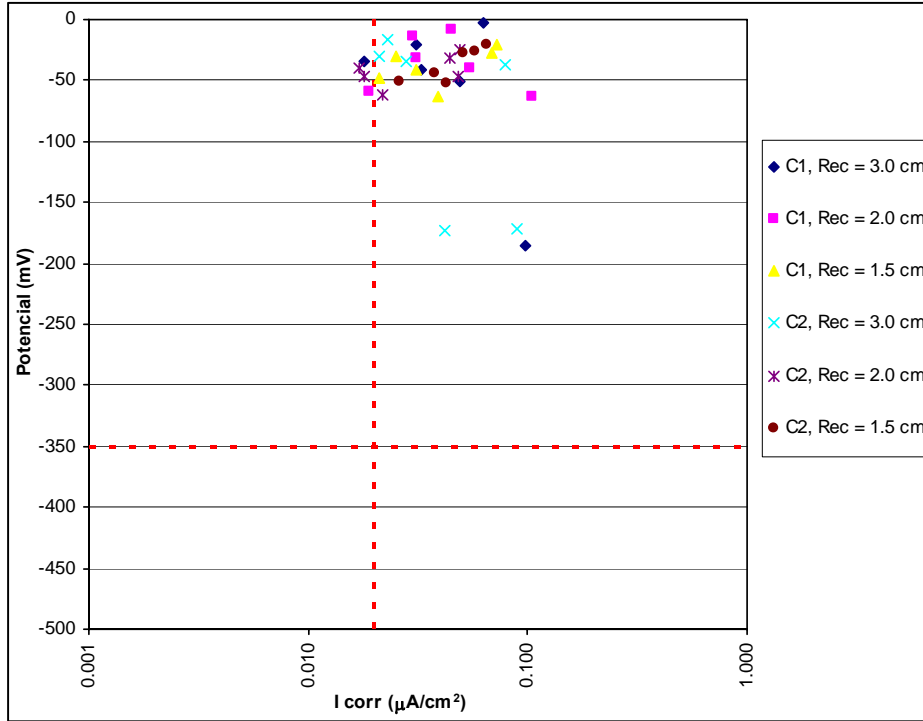
Estación: México,D.F. (Mx7)



Número de Medición: 4Fecha: 23/10/2003Estación: México,D.F. (Mx7)Número de Medición: 5Fecha: 05/12/2003Estación: México,D.F. (Mx7)

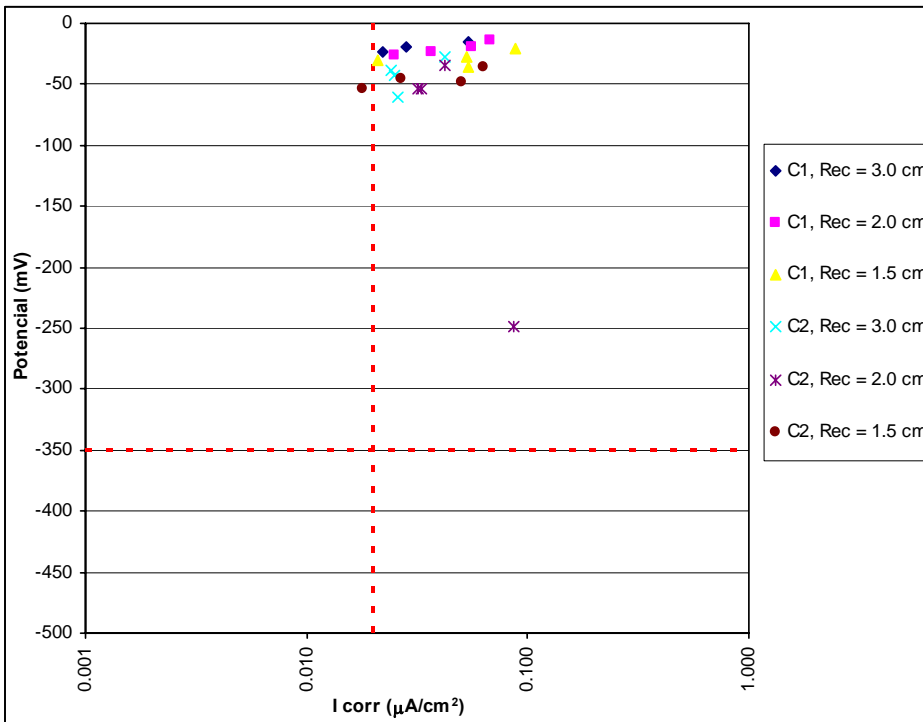
Número de Medición: 6
Fecha: 26/01/2004

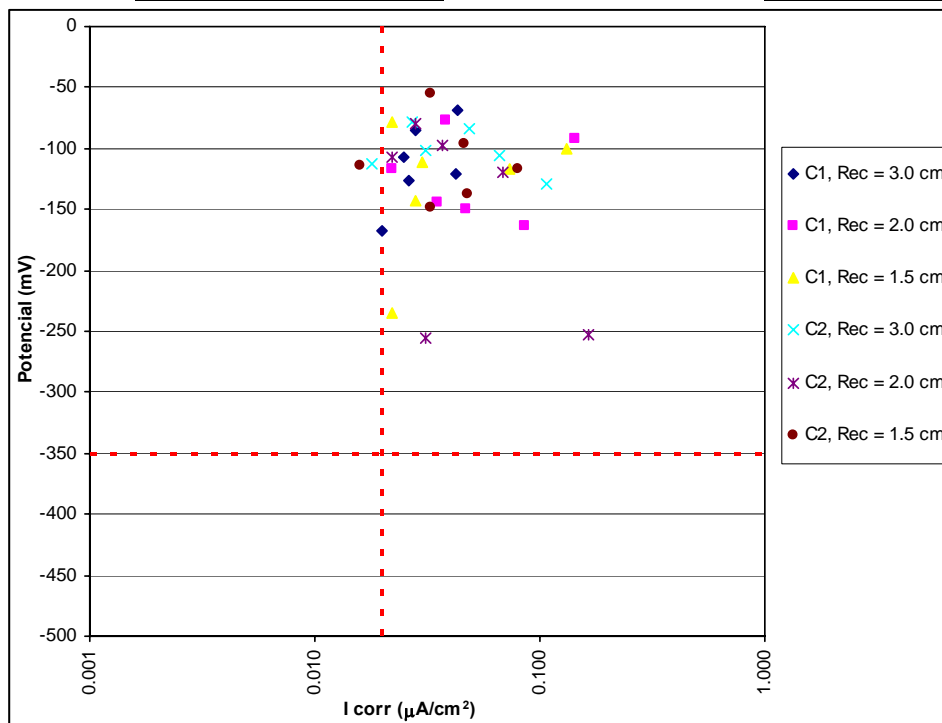
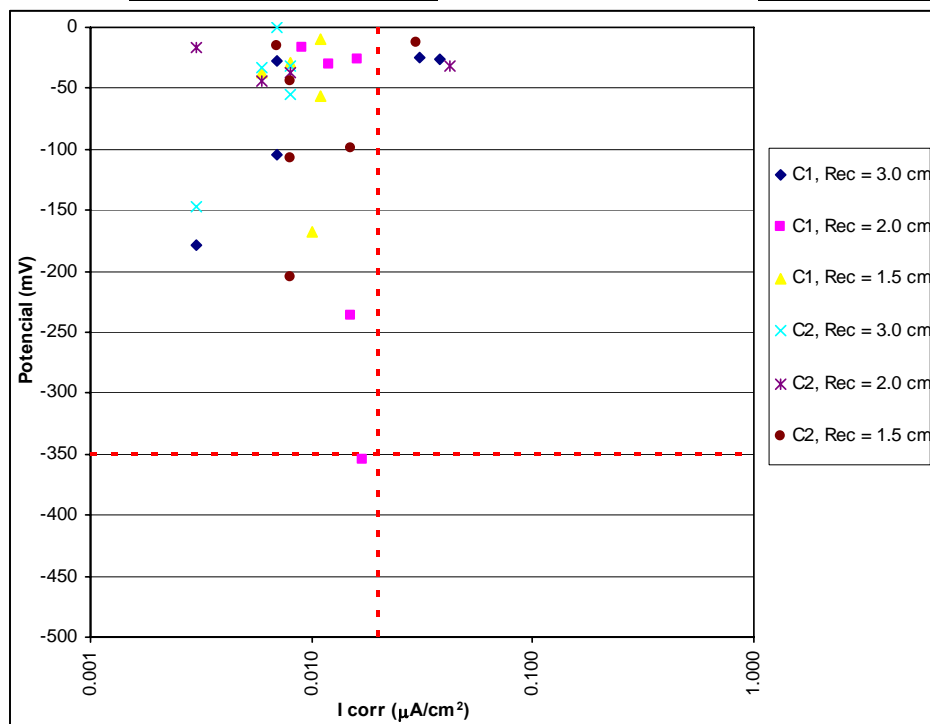
Estación: México,D.F. (Mx7)



Número de Medición: 7
Fecha: 27/02/2004

Estación: México,D.F. (Mx7)

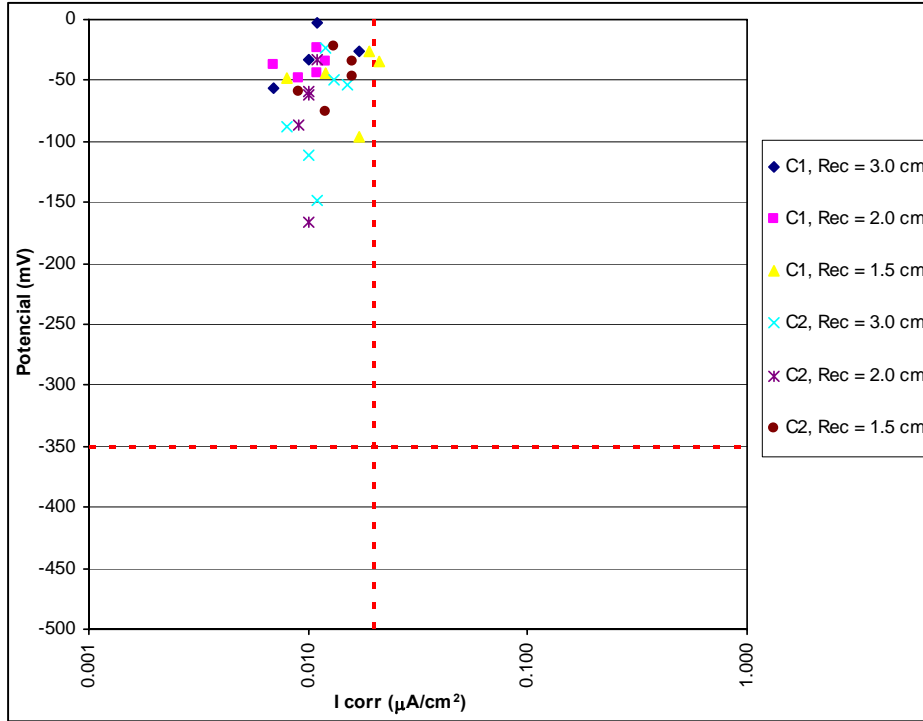


Número de Medición: 8Fecha: 30/06/2004Estación: México,D.F. (Mx7)Número de Medición: 9Fecha: 13/12/2004Estación: México,D.F. (Mx7)

Número de Medición: 10

Fecha: 28/01/2005

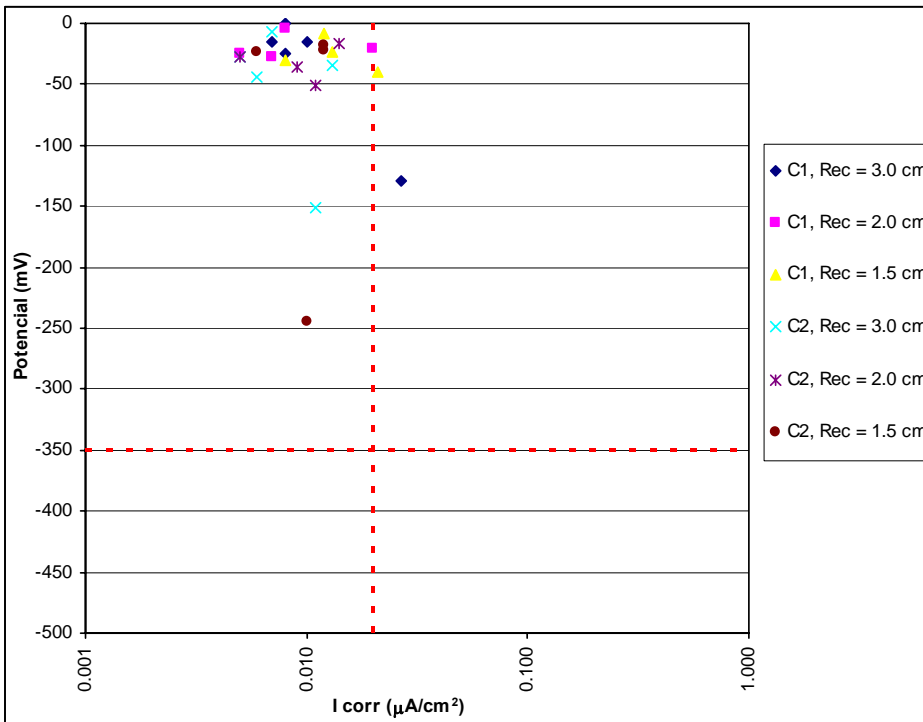
Estación: México, D.F. (Mx7)



Número de Medición: 11

Fecha: 07/03/2005

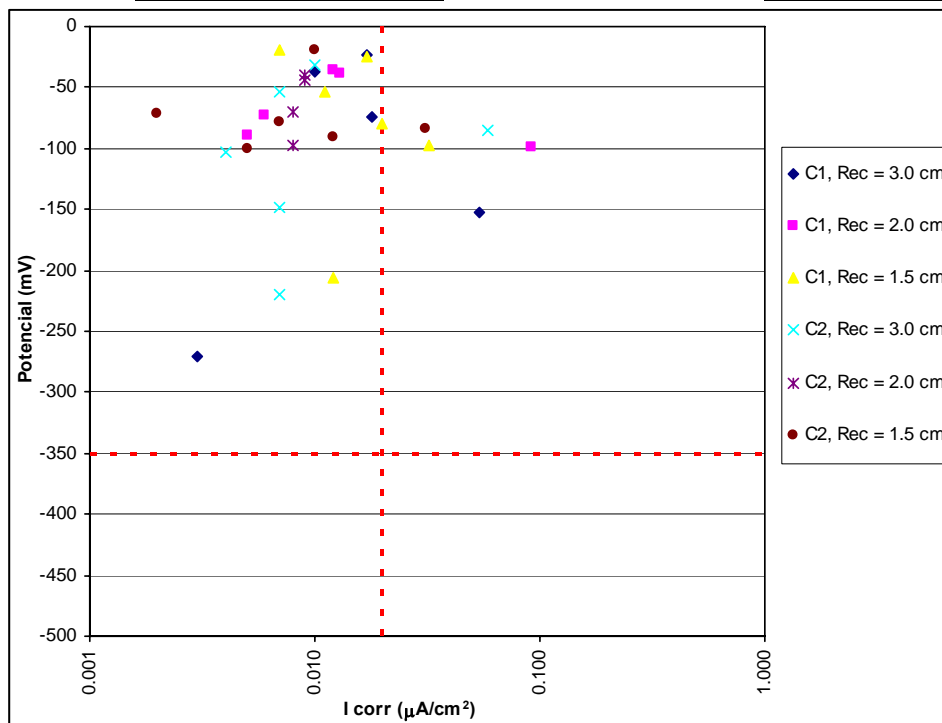
Estación: México, D.F. (Mx7)



Número de Medición: 12

Fecha: 22/04/2005

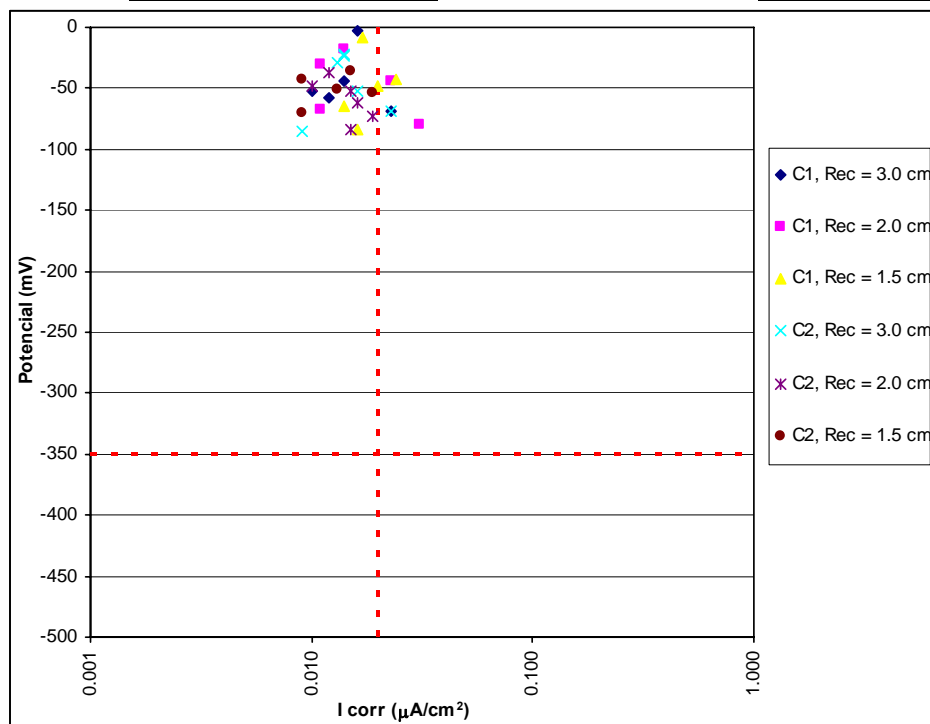
Estación: México,D.F. (Mx7)



Número de Medición: 13

Fecha: 27/05/2005

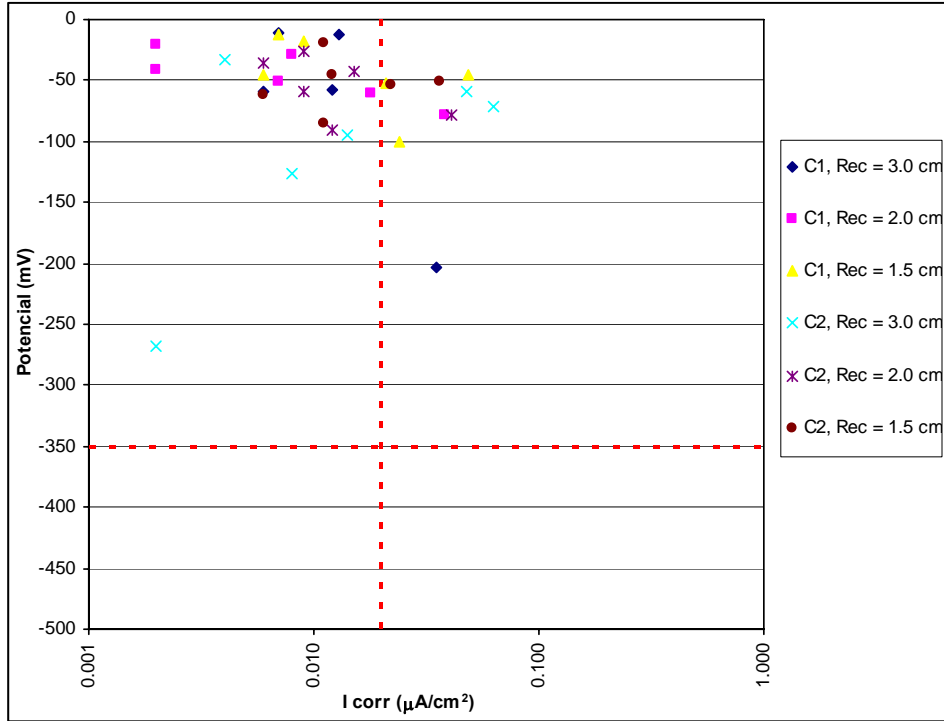
Estación: México,D.F. (Mx7)



Número de Medición: 14

Fecha: 20/06/2005

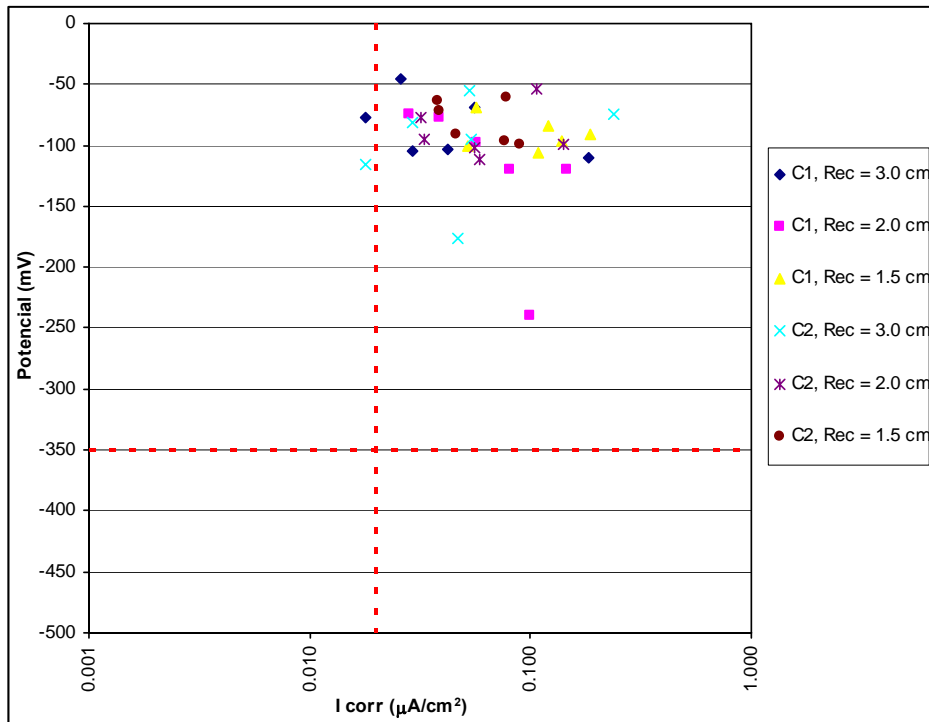
Estación: México, D.F. (Mx7)



Número de Medición: 1

Fecha: 18/07/2003

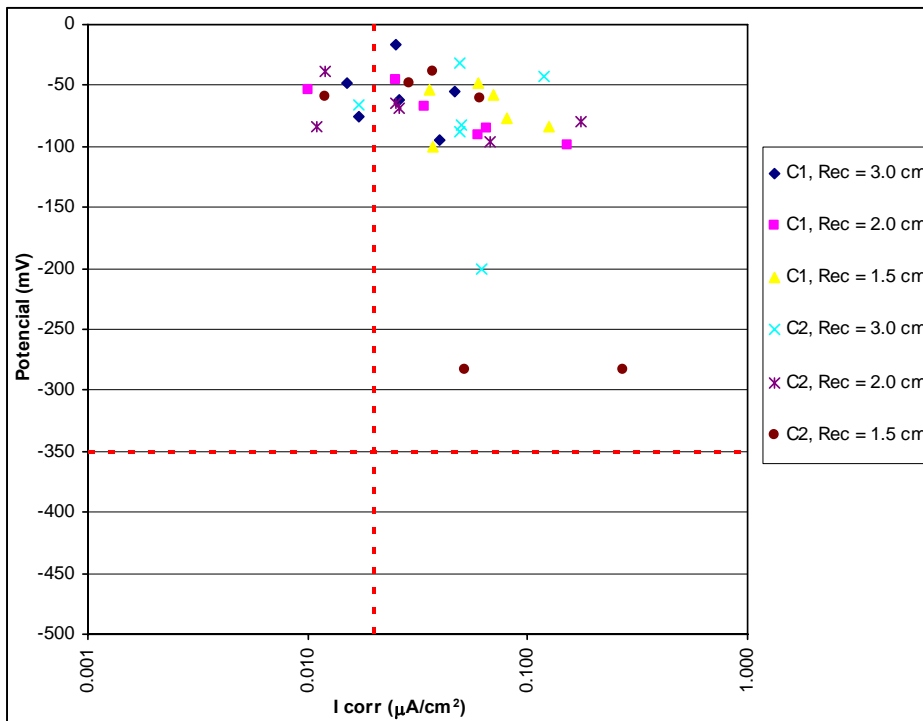
Estación: Querétaro (Mx8)



Número de Medición: 2

Fecha: 03/09/2003

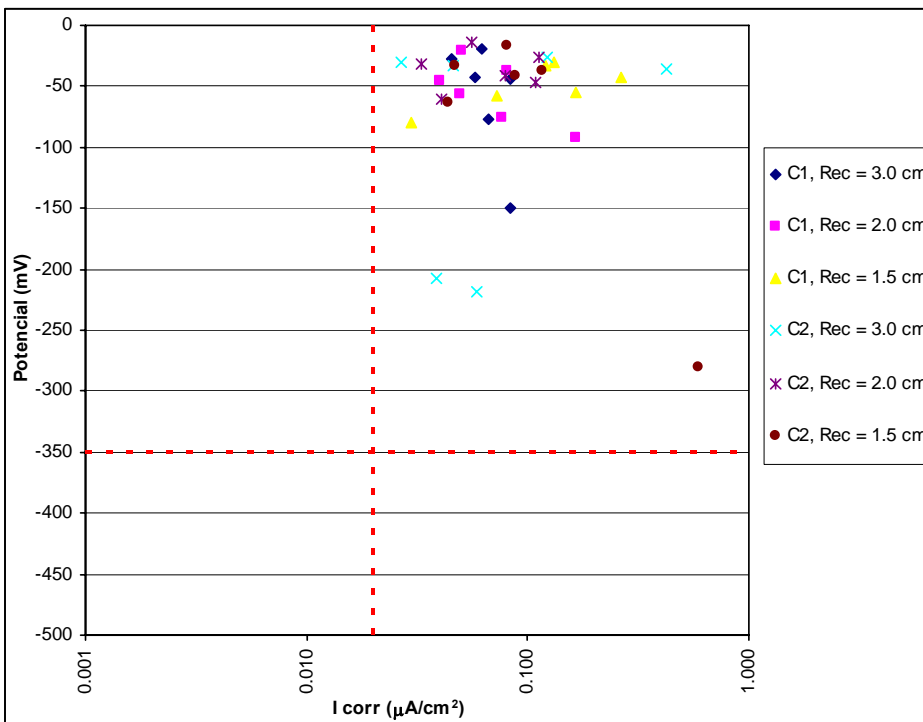
Estación: Querétaro (Mx8)



Número de Medición: 3

Fecha: 20/10/2003

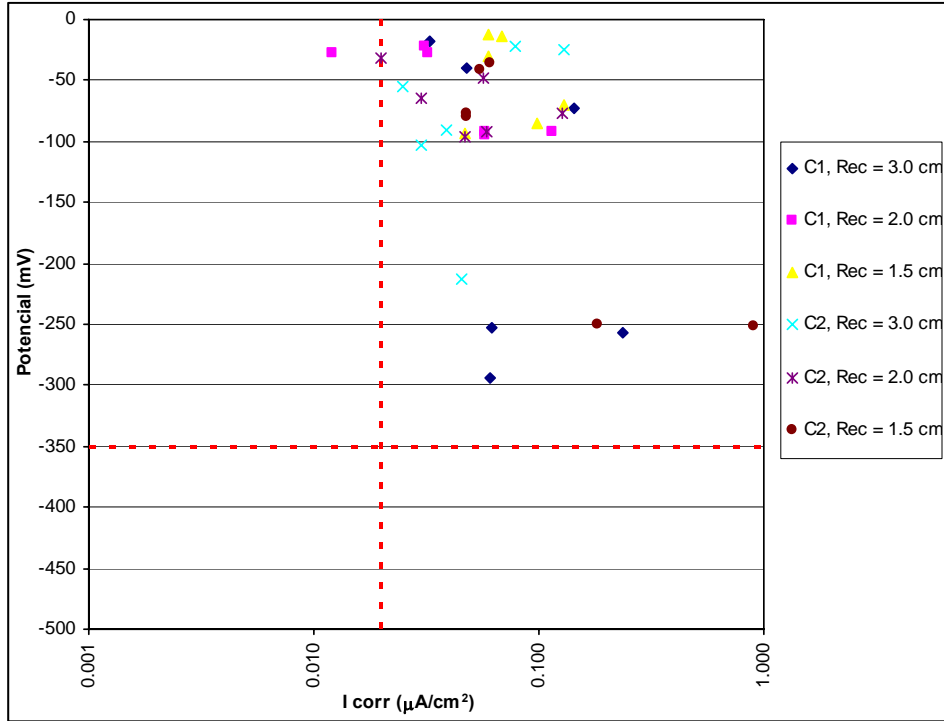
Estación: Querétaro (Mx8)



Número de Medición: 4

Fecha: 17/12/2003

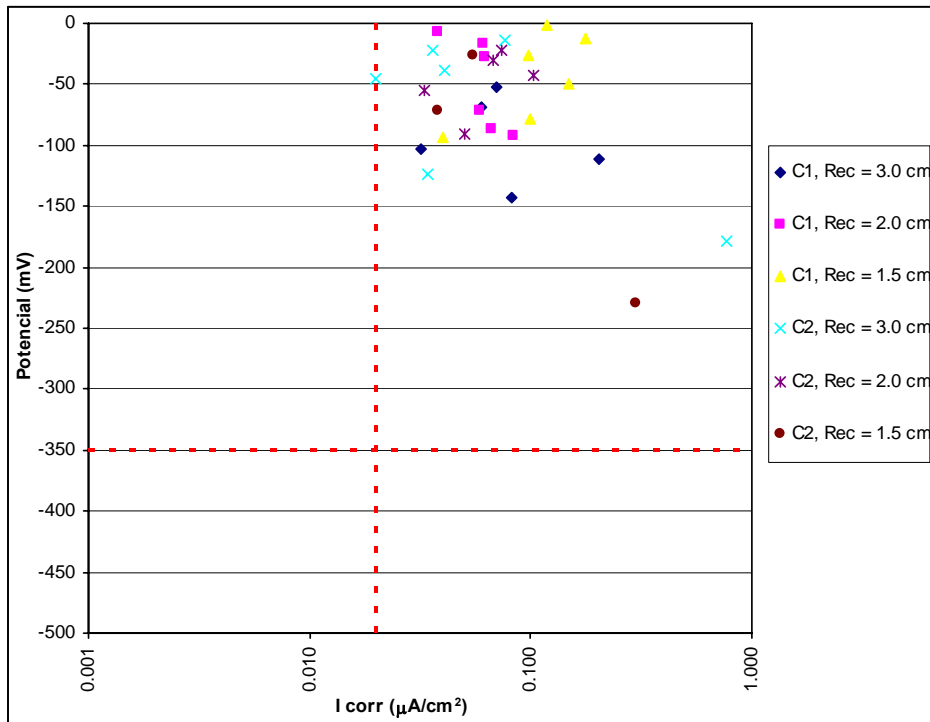
Estación: Querétaro (Mx8)



Número de Medición: 5

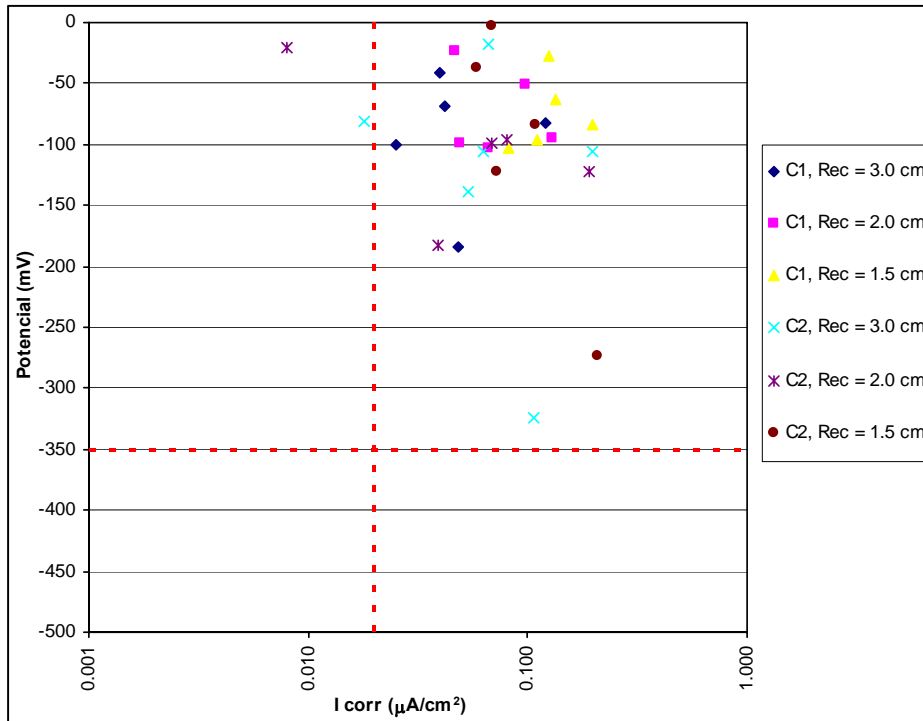
Fecha: 05/03/2004

Estación: Querétaro (Mx8)



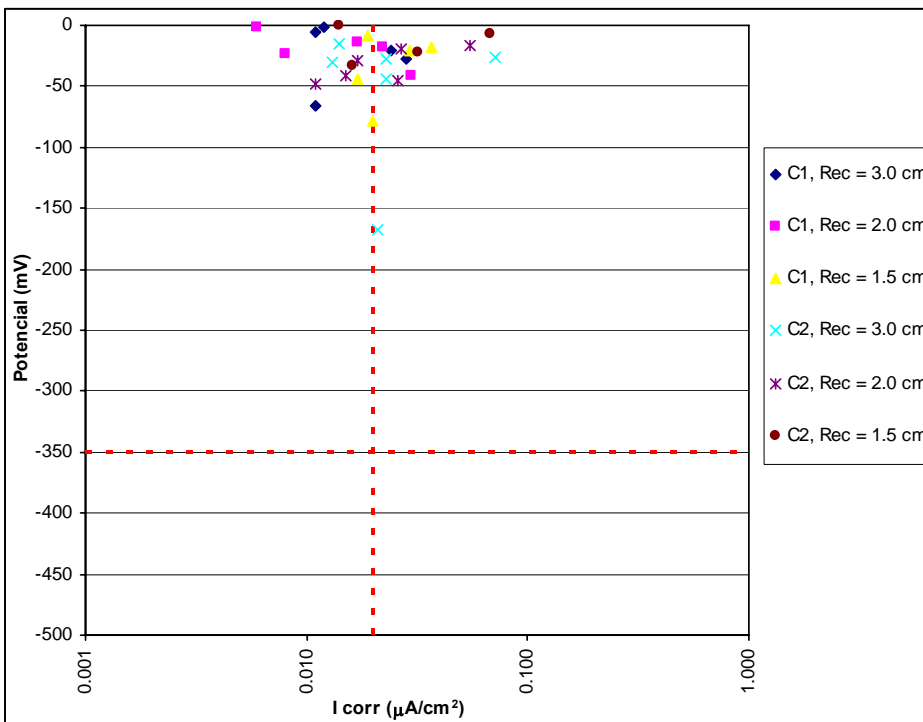
Número de Medición: 6
 Fecha: 21/05/2004

Estación: Querétaro (Mx8)



Número de Medición: 7
 Fecha: 08/12/2004

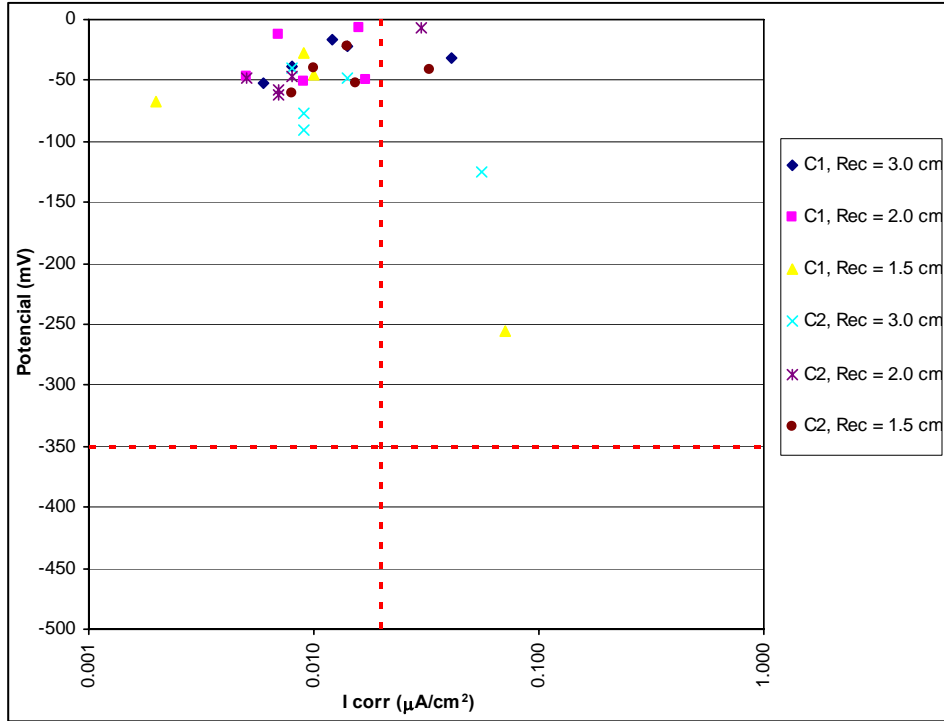
Estación: Querétaro (Mx8)



Número de Medición: 8

Fecha: 24/02/2005

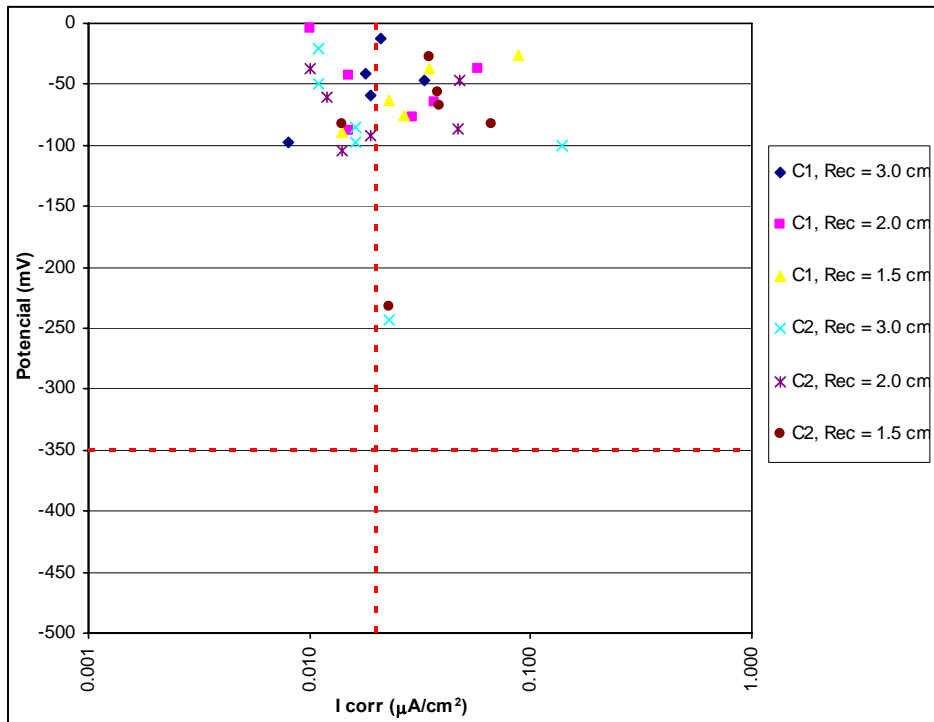
Estación: Querétaro (Mx8)



Número de Medición: 9

Fecha: 06/04/2005

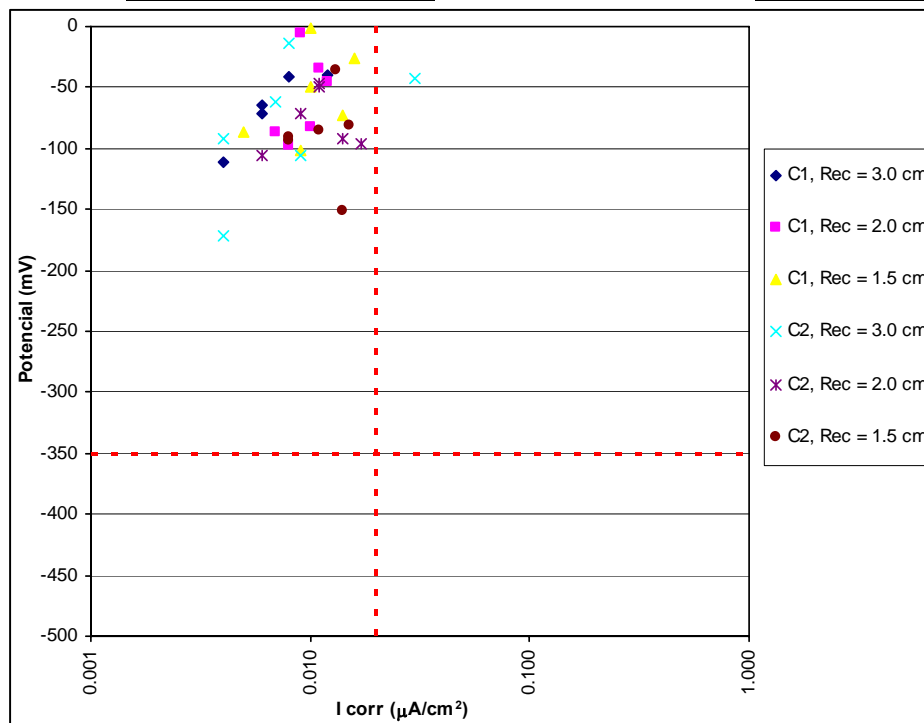
Estación: Querétaro (Mx8)



Número de Medición: 10

Fecha: 01/06/2005

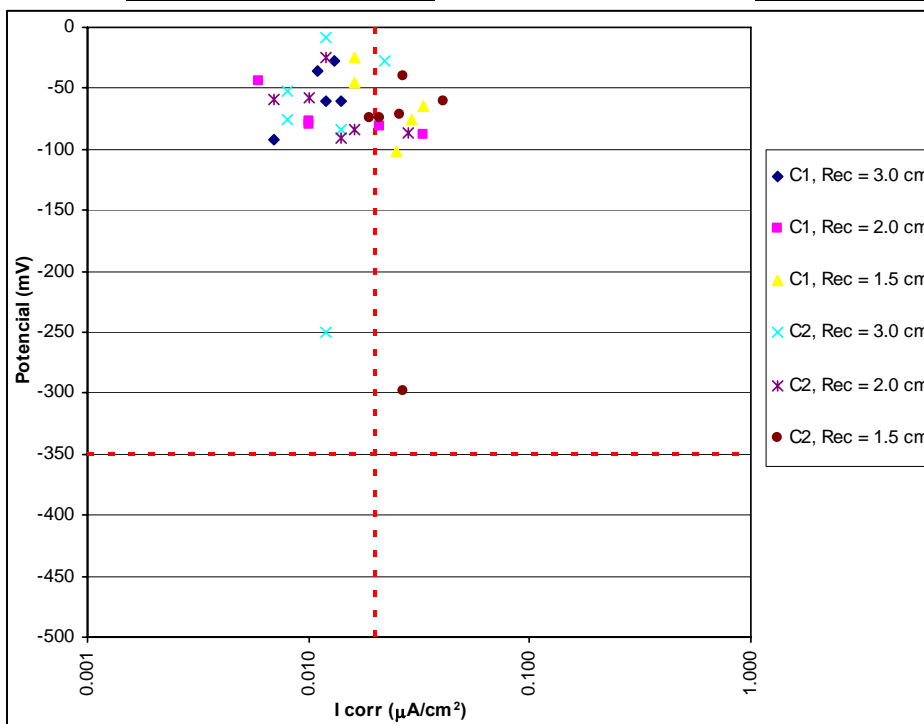
Estación: Querétaro (Mx8)



Número de Medición: 11

Fecha: 13/07/2005

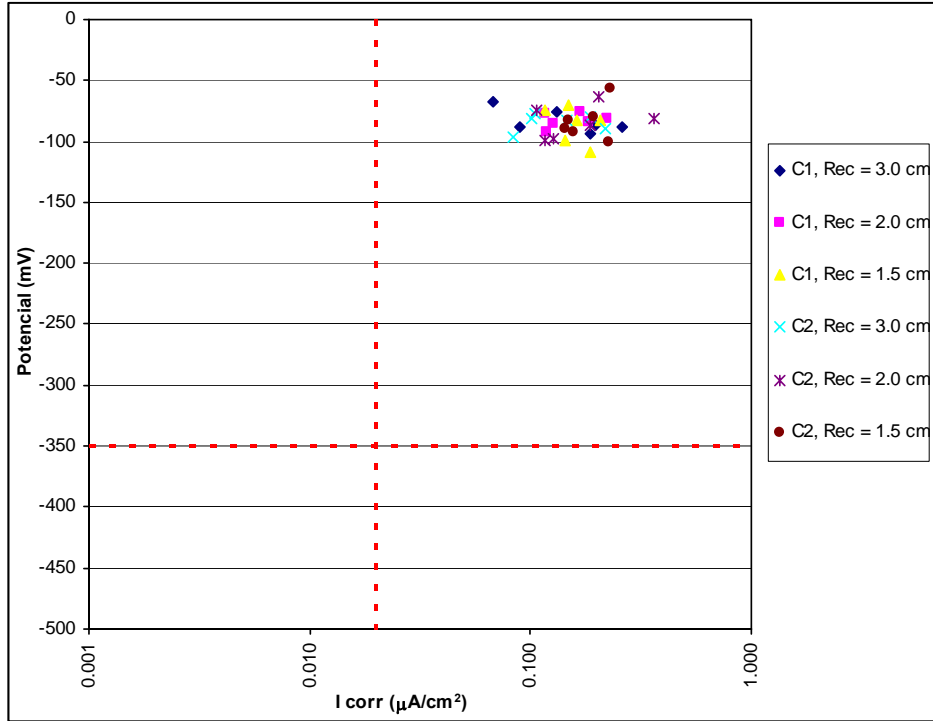
Estación: Querétaro (Mx8)



Número de Medición: 1

Fecha: 16/06/2003

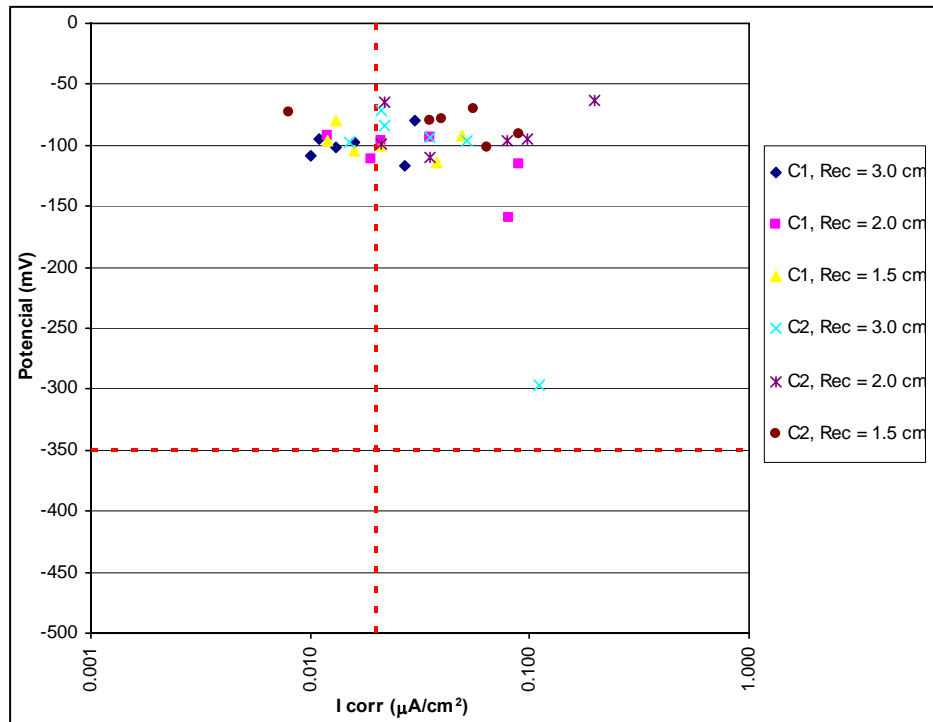
Estación: Toluca (Mx9)

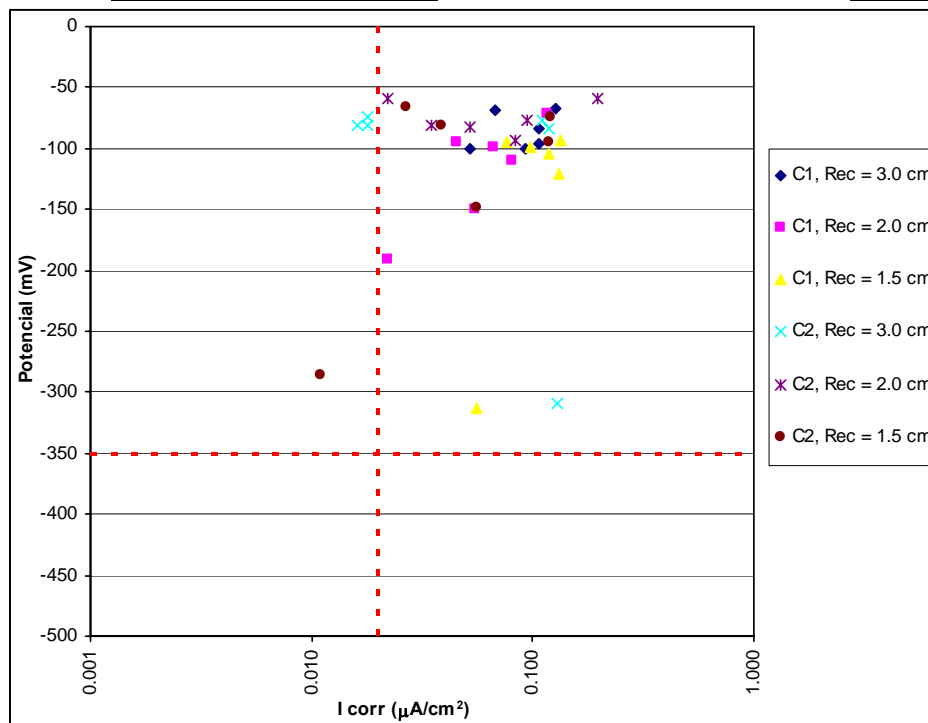
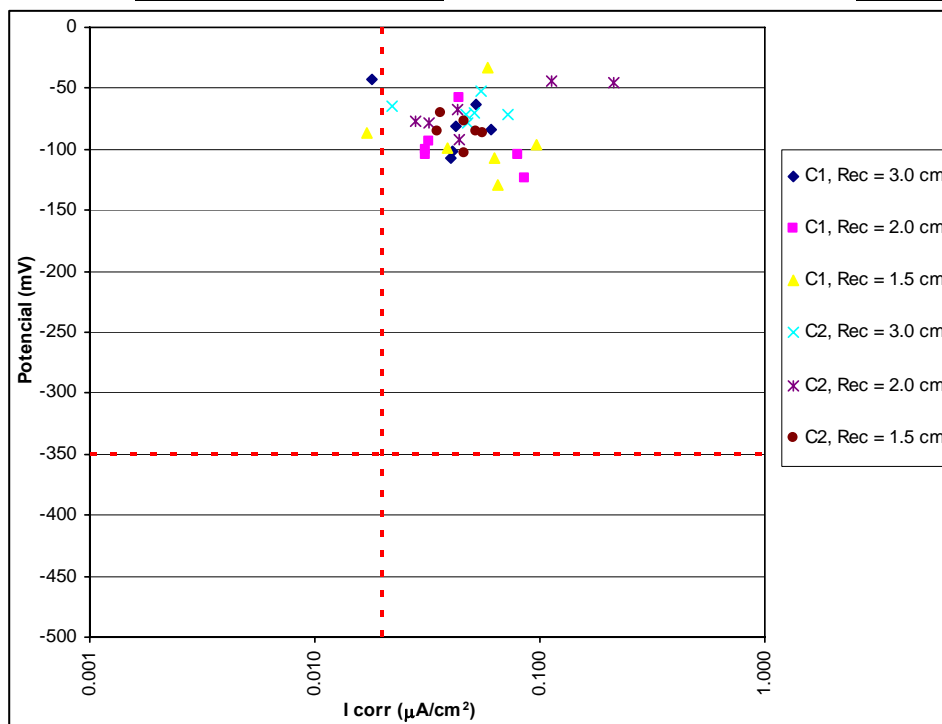


Número de Medición: 2

Fecha: 16/07/2003

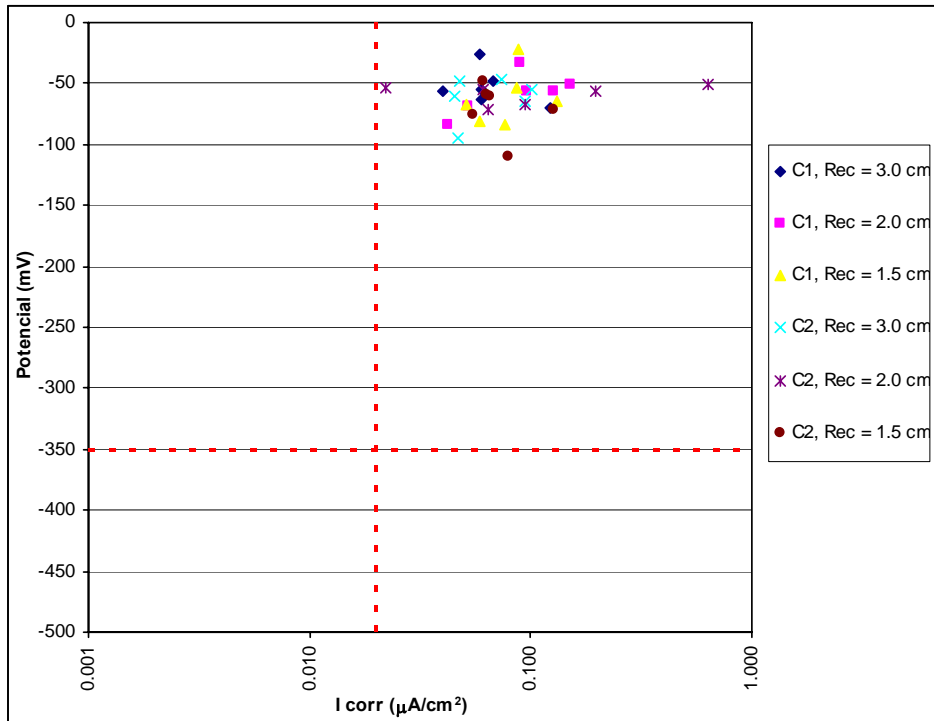
Estación: Toluca (Mx9)



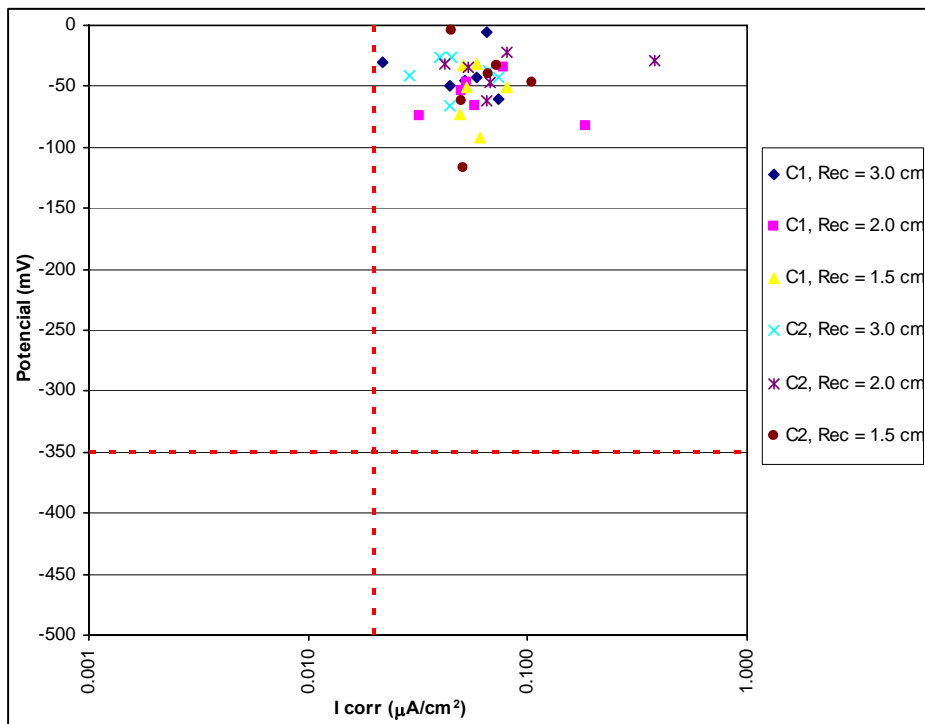
Número de Medición: 3Fecha: 28/08/2003Estación: Toluca (Mx9)Número de Medición: 4Fecha: 23/10/2003Estación: Toluca (Mx9)

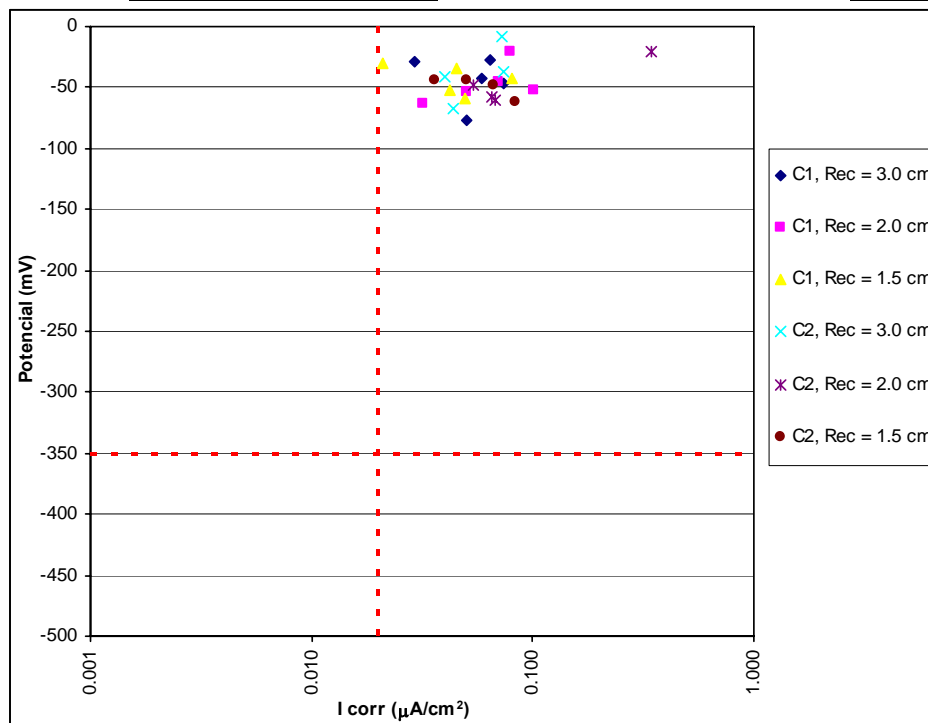
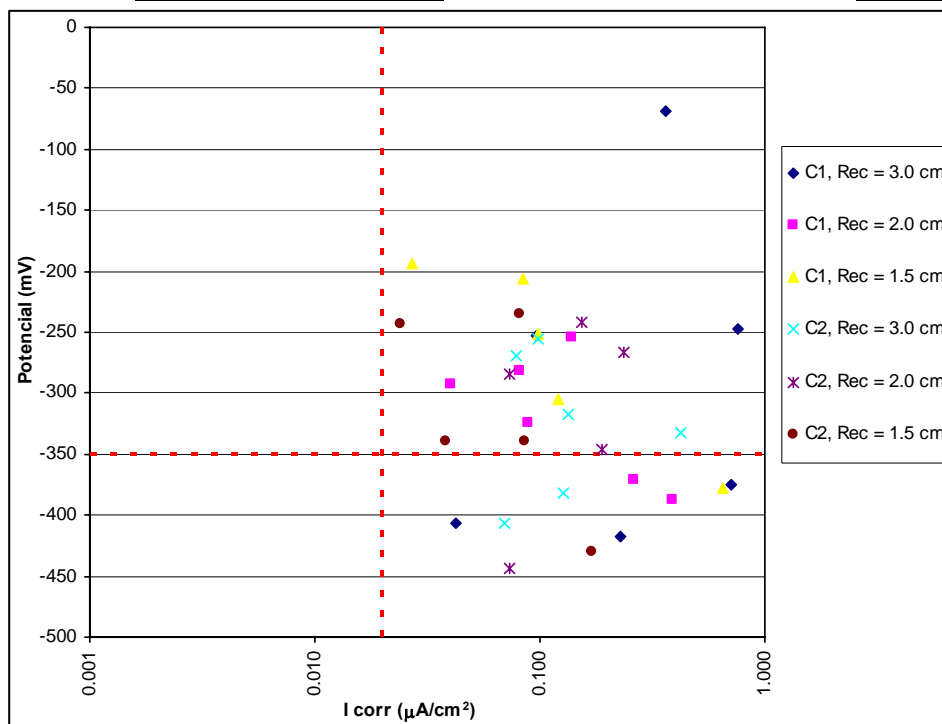
Número de Medición: 5
Fecha: 04/12/2003

Estación: Toluca (Mx9)



Número de Medición: 6
Fecha: 27/01/2004

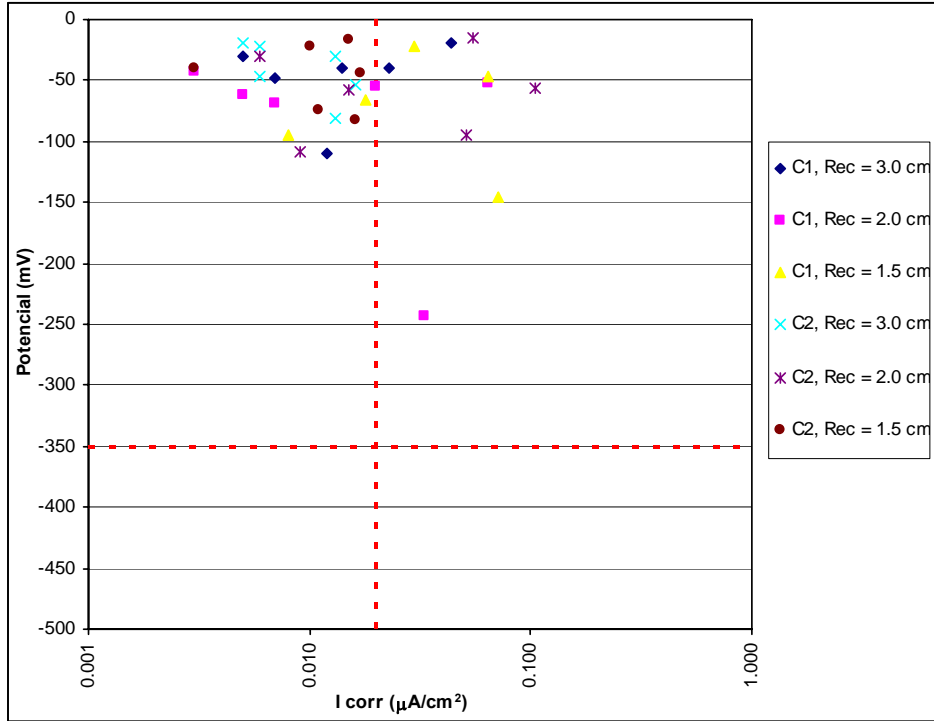


Número de Medición: 7Fecha: 26/02/2004Estación: Toluca (Mx9)Número de Medición: 8Fecha: 29/06/2004Estación: Toluca (Mx9)

Número de Medición: 9

Fecha: 14/12/2004

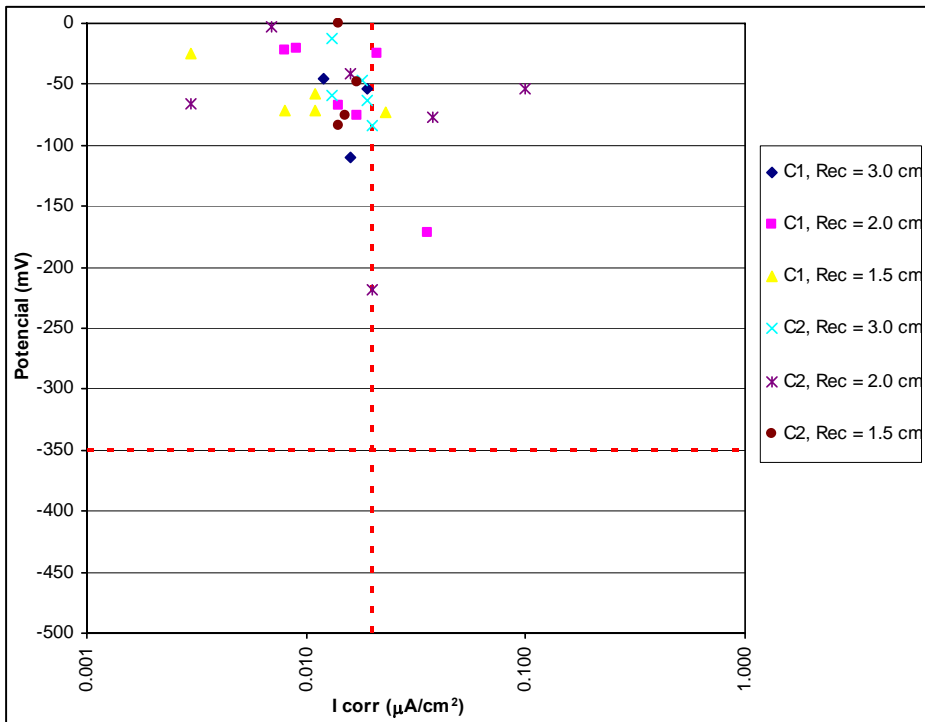
Estación: Toluca (Mx9)

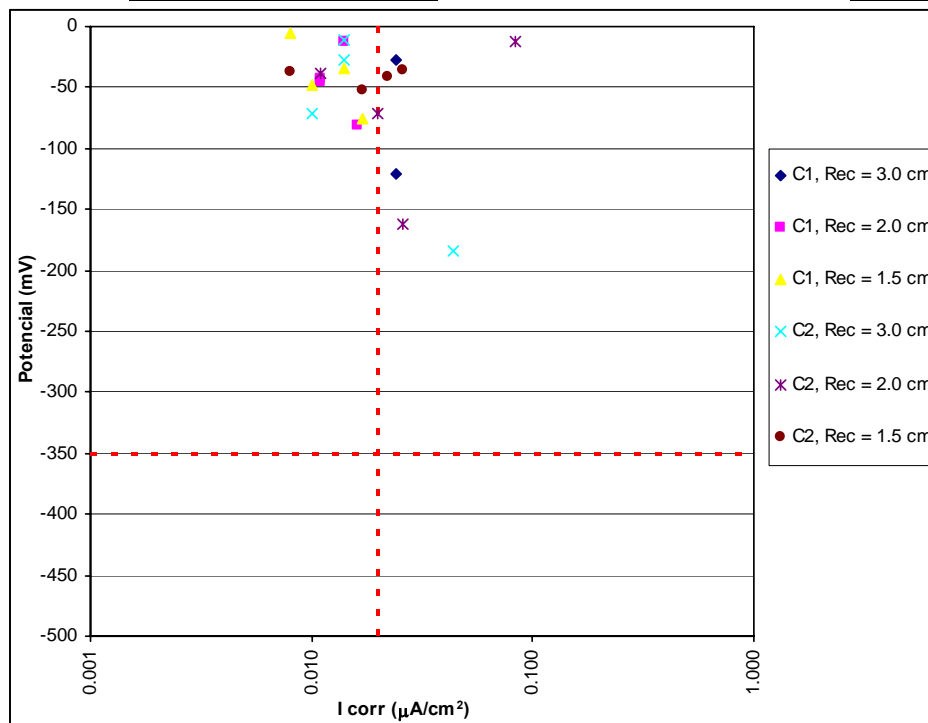
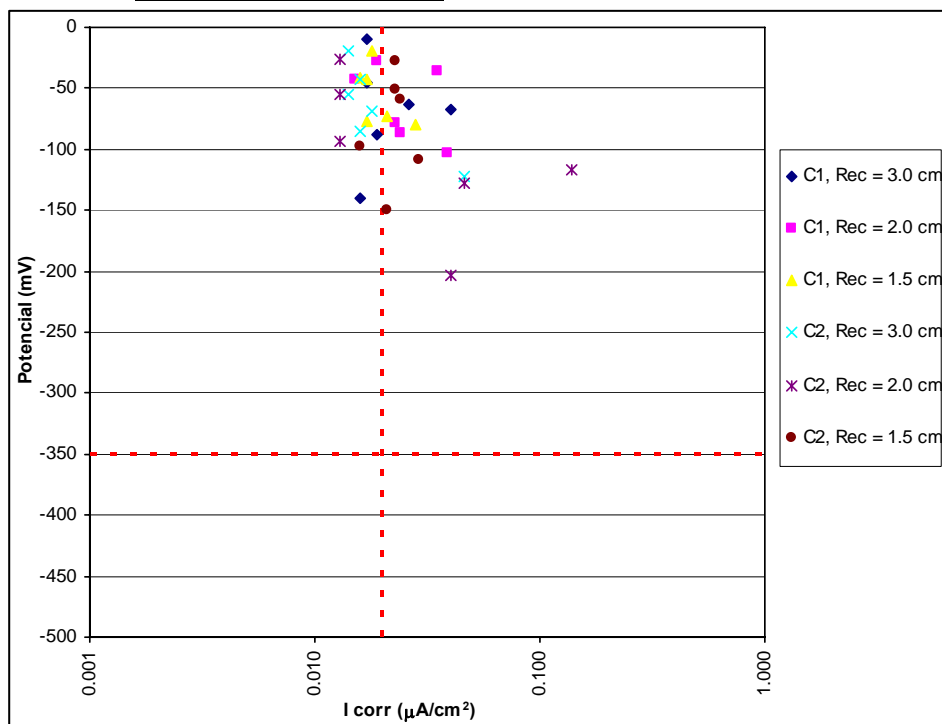


Número de Medición: 10

Fecha: 27/01/2005

Estación: Toluca (Mx9)

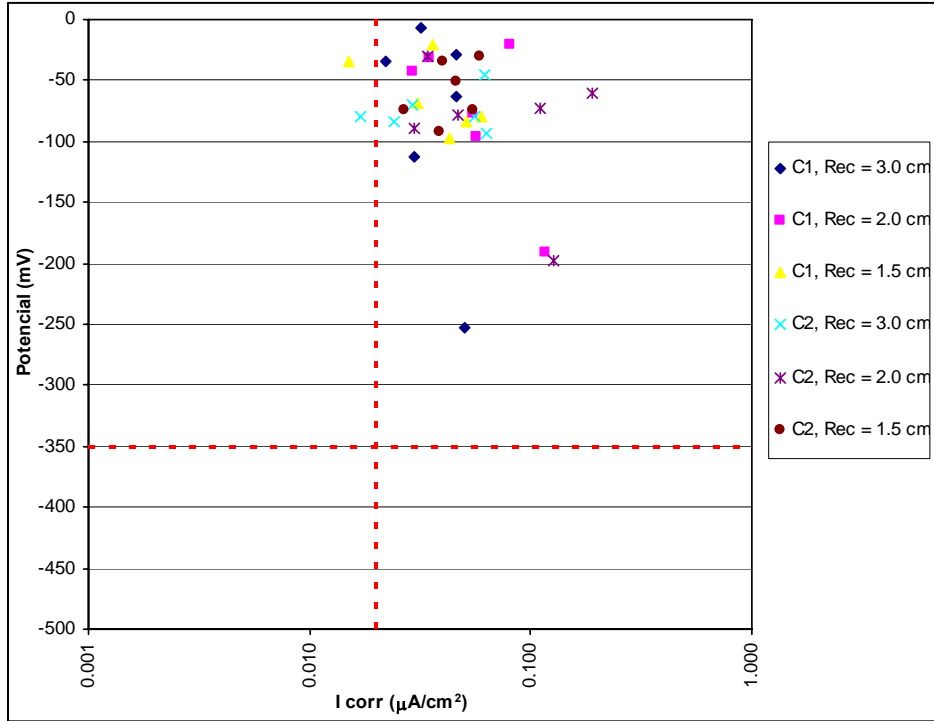


Número de Medición: 11Fecha: 08/03/2005Estación: Toluca (Mx9)Número de Medición: 12Fecha: 26/05/2005

Número de Medición: 13

Fecha: 21/06/2005

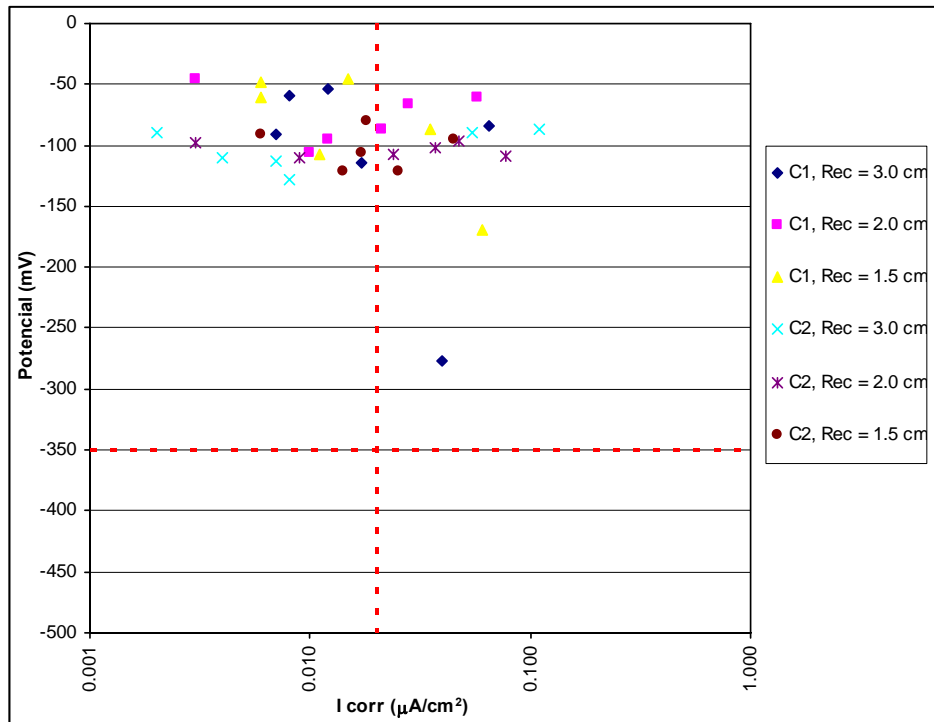
Estación: Toluca (Mx9)

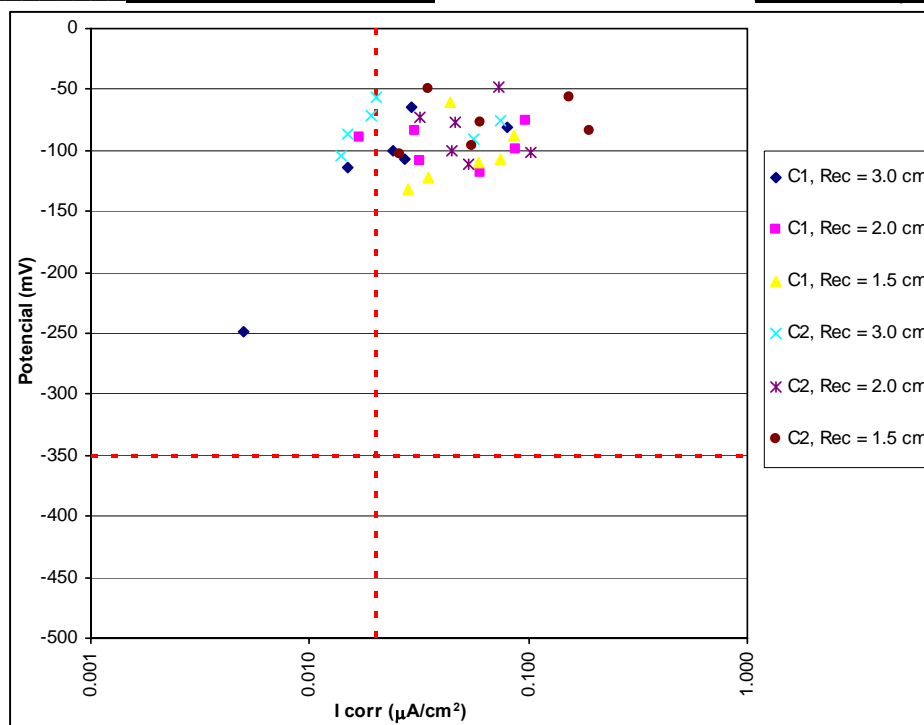
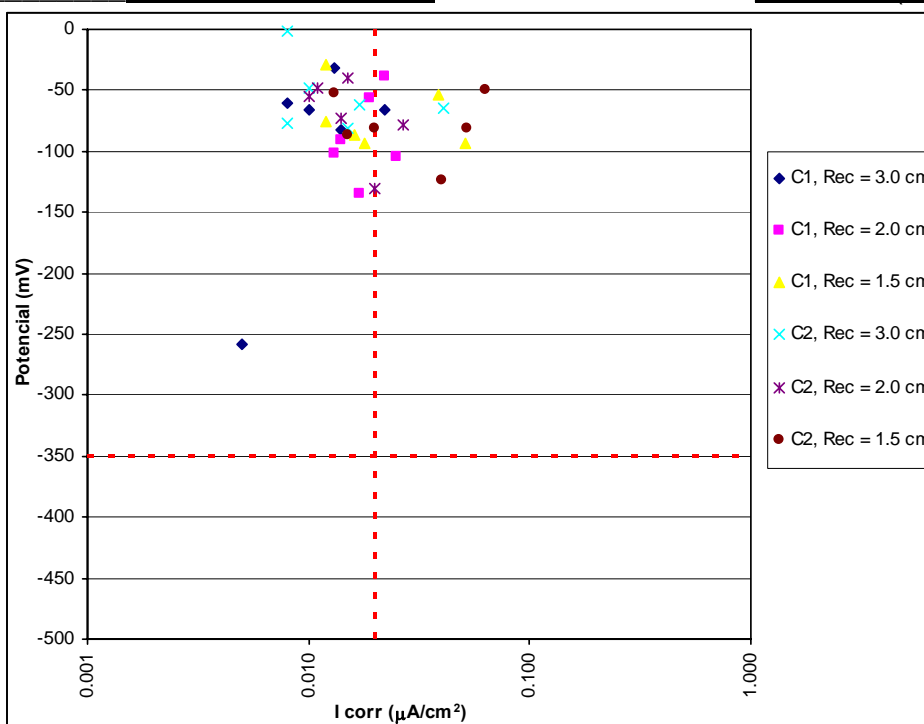


Número de Medición: 1

Fecha: 16/06/2003

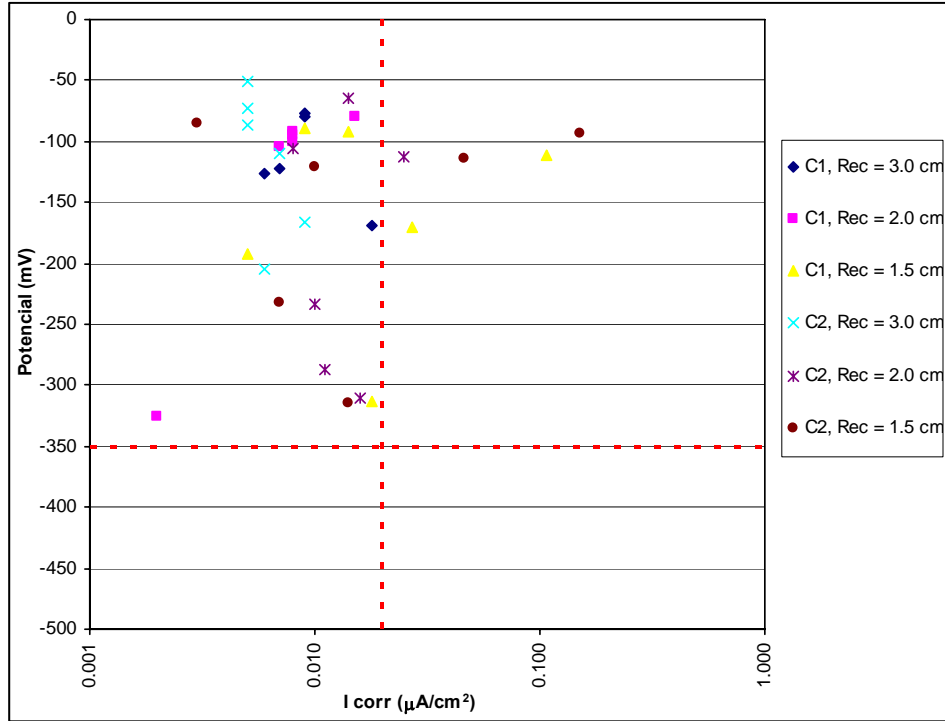
Estación: Mexicali (Mx10)



Número de Medición: 2Fecha: 18/03/2004Estación: Mexicali (Mx10)Número de Medición: 3Fecha: 10/02/2005Estación: Mexicali (Mx10)

Número de Medición: 4
Fecha: 26/07/2005

Estación: Mexicali (Mx10)





‡ **Certificación ISO 9001:2000 según documento No 0109-2007-AQ-MEX-EMA, vigente hasta el 24 de octubre de 2009 (www.imt.mx)**

CIUDAD DE MÉXICO

Av Nuevo León 210, piso 2
Col Hipódromo Condesa
06100, México, D F
tel (55) 5265 3190
fax (55) 5265 3190 ext 4711

SANFANDILA

km 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro
tel (442) 216-9777
fax (442) 216-9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx