



UMSNH

Facultad de Ingeniería Civil

Maestría en
Infraestructura del
Transporte en la Rama de
las Vías Terrestres

**INFLUENCIA DE LA ACCIÓN DEL MEDIO
AMBIENTE EN LA DURABILIDAD DEL
CONCRETO, EN UNA ATMÓSFERA URBANA,
CASO MORELIA, MICHOACÁN.**



TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. NOÉ CARMONA LEAL

ASESOR:
**M. A. ING. WILFRIDO MARTINEZ
MOLINA**

Morelia, Mich, Diciembre 2007

***INFLUENCIA DE AL ACCIÓN DEL
MEDIO AMBIENTE EN LA
DURABILIDAD DEL CONCRETO,
EN UNA ATMÓSFERA URBANA,
CASO MORELIA, MIHOACÁN***

AGRADECIMIENTOS

A TI SEÑOR

Por estar en mi corazón y guiarme día a día,
por lo que me das y por ayudarme
a soportar lo bueno y lo malo, por mis amigos,
por mis padres y por esa persona especial que tengo a mi lado.

A MIS PADRES

Gracias por ayudarme en las buenas y en las malas,
por haberme dado la educación y el amor de padres,
por su preocupación y paciencia, gracias por la vida.

A MIS HERMANAS

Por estar junto a mí, no solo como hermanas
sino como amigas, por escucharme y comprenderme,
gracias por todo las quiero.

A MIS SOBRINAS

Por hacerme creer una vez más en la inocencia,
y con ello tener ganas de seguir avanzando hasta
concluir este proyecto.

A TI, QUE TE QUIERO GUADALUPE GARCÍA

Por aguantar mi carácter cuando estaba estresado,
por haberme dejado conocerte y dejarte conocerme,
por esos momentos que estamos juntos y el tiempo no importa,
por tus llamadas y bromas, por hacerme la vida feliz,
porque sin todo ello hubiera sido más duro el terminar,
y no hubiera tenido ganas de continuar en la tesis,
por todo ello gracias.

A LA DRA ELIA Y AL ING WILFRIDO.

Por ayudarme en todo lo posible,
por el apoyo brindado hasta el día de hoy,
por sus asesorías y confianza.

A MIS AMIGOS ERICK, SANDRA, HUGO, LAURA Y CARMEN

Por su paciencia, por escucharme y ayudarme
en algunas de las pruebas que realice, y por su
apoyo para terminar esta Tesis.

A MIS AMIGOS CLAUDIA, JANERI, CHUCHO Y DELIA

Porque aunque a veces no nos podemos ver
sé que están a mi lado, y que cuento con ellos
para todo, y que sabemos que nos apoyaremos
en lo bueno y en lo malo, los quiero.

A MI AMIGO FABIAN +

Gracias te doy por todos los momentos que platicamos,
bromeamos y nos divertimos, y que aunque tú ya no estés,
sé que nos encontraremos algún día, porque sin todo
lo que paso no hubiera decidido cambiar mi pesimismo que tenía
meses atrás, me hiciste darme cuenta que todo tiene un final,
y que uno no sabe cuando llega, y que lo mejor es vivir cada
instante y concluir con lo planeado, y todos sabemos que
tarde o temprano nos llega la hora y aunque te adelantaste solo un poco,
nosotros estaremos también haya, hasta pronto.

ÍNDICE

I. Resumen.....	1
II. Introducción.....	2
III. Objetivos	5
IV. Justificación	6
V. Fundamentos de la Corrosión.....	7
V.1. Termodinámica.....	7
V.2. Tipos de Corrosión	13
V.2.1. Corrosión Localizada	13
V. 2. 2. Corrosión Uniforme/Generalizada.....	15
V. 2. 3. Corrosión Galvánica	15
V.3. Medición del Potencial.....	16
V.4. Cinética de Corrosión	16
VI. El Concreto y el Acero de Refuerzo.....	17
VI.1. Antecedentes Históricos del Concreto.....	17
VI.2. El Concreto y los Diferentes Tipos de Cemento	18
VI.3. Mecanismos de la Acción Cementante	24
VI.3.1. Reactivos de los Componentes Anhídridos	24
VI.3.2. Productos Formados en la Hidratación	25
VI.3.3. Teorías del Fraguado y el Endurecimiento	29
VI. 4. Antecedentes Históricos del Acero.....	33
VI. 5. El Acero y los Tipos de Acero	35
VI. 5. 1. Clasificación del Acero.....	36

VII. Mecanismos de Corrosión del Concreto	39
VII. 1. Dosificación del Concreto	40
VII. 2. Compacidad y Homogeneidad	42
VII. 3. Espesor de Recubrimiento del Concreto	44
VII. 4. Humedad Ambiental	45
VII. 5. Efecto del Oxígeno	46
VII. 6. Efecto de la Temperatura	48
VII. 7. Estado Superficial del Acero	48
VII. 8. Tensiones Mecánicas del Acero	49
VII. 9. Iones Despasivantes	50
VII. 9. 1. Cloruros	50
VII. 9. 2. Sulfatos	51
VII. 10. Carbonatación	53
VII. 11. Causas de la Corrosión de las Armaduras	56
VIII. Técnicas Para Estimar el Estado de Corrosión en el Concreto	57
VII. 1. Prueba de Medición de Potenciales Electroquímicos (Norma ASTM-C-876-91).....	57
VIII. 2. Velocidad de Corrosión	60
VIII. 3. Determinación de la Profundidad de la Carbonatación	62
VIII. 3. 1. Equipos y Materiales Determinar el Grado de Carbonatación	63
VIII. 3. 2. Procedimiento Para la Obtención del Grado de Carbonatación	63
VIII. 3. 3. Criterios de Evaluación	65
VIII. 4. Concentración de Cloruros	67
IX. Pruebas y Resultados	70
IX. 1. Pruebas de Carbonatación	70
IX. 2. Pruebas de Velocidad de Corrosión, Potencial de Corrosión y Resistividad Eléctrica, con el Equipo Gcorr	74

X. Conclusiones	105
Bibliografía	107
Glosario	110

I. RESUMEN

La tesis presente es una investigación en conjunto con el proyecto DURACON, y se busca la caracterización de la durabilidad del concreto en Iberoamérica, el cual se encuentra expuesto al medio ambiente en dos atmosferas, una marina y la otra urbana, con ello se aborda la problemática de la corrosión que se encuentra en el acero embebido en el concreto hidráulico, y como puede afectar la relación agua/cemento (a/c), en este proceso.

En la investigación experimental, se realizaron 12 probetas, las cuales tenían medidas establecidas (15 x 15 x 30 cm), de entre ellas 6 fueron armadas con varillas de 3/8" en ambas caras y con un recubrimiento del concreto de 1.5, 2.0 y 3.0 cm, y las otras 6 probetas fueron sin armar.

Las probetas se colaron con dos tipos de concreto, uno de ellos con relación $a/c = 0.45$ y el otro con relación $a/c = 0.65$. Exponiéndose una vez fraguado y curado el concreto, al medio ambiente, y colocándose de tal forma que una de las caras quedará expuesta a los vientos dominantes de la ciudad de Morelia y la otra no.

A las seis probetas con acero, se les sometió a pruebas para determinar la velocidad de corrosión, el potencial de corrosión y la resistividad eléctrica, con el equipo de Gcorr 6 y Gcorr 8, con el fin de saber el avance de corrosión del acero embebido en el concreto, y a su vez saber cuál de los dos tipos de probetas armadas presenta mejores características y mejor resistencia al medio ambiente.

De las otras seis probetas que no se armaron, se utilizaron para medir la profundidad de carbonatación utilizando para ello una guillotina para concreto, y fenolftaleína.

II. INTRODUCCIÓN

Hoy día uno de los materiales que más se consumen y producen en el mundo es el cemento, así mismo es uno de los que mayormente se exportan e importan, la tabla II. 1, perteneciente al año 2006, nos puede dar una idea de cómo nos encontramos hoy día con el crecimiento constante de los países.

Tabla II. 1. Producción de cemento de los países que se encuentran dentro de la Federación Iberoamericana del Cemento (FICEM) 2006 [1].

PAISES DEL FICEM	PRODUCCIÓN (MT) 2006
Argentina	8.96
Bolivia	1.64
Brazil	29.5
Caribe	5.13
Chile	4.1
Colombia	10.09
Costa Rica	1.86
Cuba	2.4
Ecuador	4.3
El Salvador	1.73
España	54.3
Estados Unidos	93.62
Guatemala	2.8
Honduras	1.47
México	38.7
Nicaragua	0.6
Panamá	1
Paraguay	0.55
Perú	5.68
Portugal	9.1
Puerto Rico	1.63
Uruguay	0.7
Venezuela	7.3
TOTAL	297.15

El concreto hidráulico es una mezcla que se obtiene de los materiales como: cemento, pétreos (grava y arena), agua y en algunas ocasiones aditivos, el cual se emplea en la construcción. Frecuentemente tiene una durabilidad que a veces es baja, debido a muchos factores, entre ellos, mal diseño, una mala elaboración y el

mal manejo constructivo; este material se usa principalmente en las zonas estructurales de edificios, pero también se usa en caminos y puentes.

La durabilidad, es uno de los términos más empleados en obras civiles, ya que en la actualidad el ingeniero se ha preocupado porque sus construcciones sean mejores y más durables, es decir, que tengan una vida más prolongada de funcionalidad, seguridad, y una resistencia adecuada para la cual se diseñó la estructura. Pero esto no siempre es posible, ya que muchas veces no se tiene un conocimiento o cuidado de realizar una construcción con concreto reforzado de la mejor manera, esto ha provocado que edificaciones, como puentes se encuentren dañados en su estructura por los agentes de corrosión, mal diseño de mezclas, inadecuados ingredientes, mal procedimiento constructivo, escaso recubrimiento, mala elección del cemento, mal proyecto, etc.

La corrosión es hoy día, un tema que necesita conocerse mejor, ya que muchas estructuras están construidas a base de concreto reforzado, entre ellas se encuentran los puentes, aeropuertos y muelles, y el tener un conocimiento claro de este agente, nos podría ayudar tanto en la reparación como en la construcción de ellas.

El fenómeno de oxidación del refuerzo metálico afecta significativamente las características funcionales del concreto armado tales como la adherencia, además de inducir la formación de agrietamientos y desprendimientos de trozos de concreto, lo que compromete la integridad estructural [2].

Este tema debe ser estudiado por varios grupos de gente, ya que es un tema que aborda química, electroquímica y cinética del proceso de corrosión, y solo de esta manera se podrá dar a conocer una mejor respuesta para este fenómeno de la naturaleza, y con ello poder prevenir y controlar su proceso de deterioro.

Cabe decirse que este fenómeno se presenta de una forma más relevante en un ambiente marino, pero se ha visto que un ambiente urbano también podemos encontrar estructuras dañadas por la corrosión, ya que una de las formas por las cuales se produce este fenómeno es por absorción/desorción, es decir por humedad y secado, o por que el elemento se encuentre saturado de agua, como por ejemplo los pilotes de un puente que cruce un río intermitente [2].

III. OBJETIVOS

Correlacionar la durabilidad del concreto con las características del medio ambiente de la ciudad de Morelia, Mich., México.

Determinar la durabilidad del concreto que se encuentre expuesto a condiciones ambientales de Morelia, basándose en la exposición de probetas armadas y sin armar en la atmósfera de esta ciudad. Esto con el fin de caracterizar los procesos de carbonatación y penetración de cloruros y sulfatos en el concreto, y en la determinación del contenido crítico de cloruros al inicio de la corrosión, así como en la medida de parámetros electroquímicos que permitan evaluar la cinética de corrosión de las armaduras.

Se busca dar a conocer cuáles son las relaciones agua-cemento (a/c) óptimas, para evitar el deterioro del concreto, debido a los agentes atmosféricos que dañan al acero y este a su vez al concreto. Por este motivo se fabricaron probetas con distintas relaciones agua-cemento, las cuales han sido expuestas a la acción del medio ambiente en una estación, de monitoreo habilitada en la azotea del laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Rúelas” de la Facultad de Ingeniería Civil.

La presente investigación forma parte del Proyecto Internacional XV. 3 DURACON del CYTED, y del Proyecto “Estudio de la Calidad del Aire en Lázaro Cárdenas, Morelia, Uruapan y Zitácuaro, del estado de Michoacán, y Propuestas de Remediación en Casos de Contaminación”, de fondos mixtos, financiado por el el CONACYT.

Recomendar en base a los resultados arrojados por las pruebas, el recubrimiento mínimo que deben tener las estructuras de concreto armado, para una mejor durabilidad.

IV. JUSTIFICACIÓN

Uno de los aspectos a considerar para este proyecto, es que pocos investigadores se han adentrado en la cuestión del deterioro del concreto y de la corrosión del acero por los agentes atmosféricos, y esto provoca que, en muchas ocasiones, se den recomendaciones para su restauración, caras y/o inapropiadas.

A nivel mundial, se encuentran muchos puentes construidos de concreto reforzado y esto implica que la corrosión este dañando muchos de estos y haciendo que se gaste demasiado dinero en sus reparaciones, ya que hasta el mes de junio del año 2007, se tuvo un porcentaje de reconstrucción del 31.5% de una meta de 68 puentes, y un porcentaje de conservación rutinaria de 45.4% de un total de 7, 207 puentes [3].

Este proyecto nos dará a conocer cuál es la relación a/c adecuada para una obra civil como lo es un puente o muelle, ya que en la actualidad estos elementos de comunicación algunos se encuentran muy dañados, y por ende necesitan rehabilitación, o en el caso de construirlos esto nos ayudará a tener una obra mejor y más durable, para dar un mejor servicio a la comunidad.

Por todo esto es de mi interés el adentrarme en este proyecto para unirme a la investigación de cómo prevenir y mejorar las obras de ingeniería que estén hechas a base de concreto hidráulico reforzado en las vías terrestres, como lo son los puentes, puertos y aeropuertos.

V. FUNDAMENTOS DE LA CORROSIÓN

El concreto da al acero una protección de doble naturaleza: por una parte, es una barrera física que lo separa del medio ambiente y por otro, el líquido que es encerrado entre los poros del concreto es un óxido electrolítico que puede formar un óxido protector (pasivación) de acción duradera. En un inicio se pensó que el hidróxido de calcio ($\text{pH} \approx 12.5$) el cual se produce durante las reacciones de hidratación del curado, era el componente principal que proporcionaba esta alcalinidad; hoy día se ha demostrado que el pH de la solución en los poros es de 13 a 14, esto causado por los hidróxidos de sodio y potasio, gracias a que el ion calcio desaparece de la disolución a medida que el cemento se va hidratando. La cantidad de los iones calcio depende fundamentalmente de la composición y características del cemento, de la hidratación y la relación agua/cemento (a/c) [2].

V.1. CORROSIÓN DEL REFUERZO EN EL CONCRETO

El fenómeno de la corrosión es uno de los enemigos naturales más perseverantes y silenciosos de las obras civiles del hombre. Es el principal mecanismo de deterioro que presentan los metales por acción del medio ambiente [4].

La corrosión de armaduras es un proceso electroquímico que provoca la degradación (oxidación) del acero en el concreto hidráulico. Los factores que afectan a este fenómeno están asociados fundamentalmente a las características del concreto hidráulico, al medio ambiente y a la disposición de las armaduras en los componentes estructurales afectados [5].

A su vez la corrosión se da gracias a la falta de uniformidad en el acero (diferentes aceros, soldaduras, sitios activos sobre la superficie del acero), contacto con metales menos activos, y las heterogeneidades en el medio físico o químico del concreto que rodea al acero. Si bien esto ocasiona la corrosión también se sabe

que la capa pasivante que se forma alrededor de él, lo protege durante mucho tiempo, pero si las condiciones de servicio cambian, y el concreto es alterado, o ya sea que a través de sus poros penetren sustancias agresivas, esto ayuda a que se desencadene el rompimiento de la película y la corrosión se desencadena con triple consecuencia:

1. El acero disminuye su sección o puede ser que se convierta totalmente en oxido.
2. El concreto se puede fisurar o delaminar gracias a la presión que ejerce el oxido al generarse.
3. La adherencia armadura-concreto disminuye o desaparece.

Existen dos causas importantes para que se lleve a cabo la corrosión en el acero embebido en el concreto, las cuales son:

1. Reducción de la alcalinidad por lixiviación de las sustancias alcalinas con agua o neutralización parcial con dióxido de carbono u otro material ácido.
2. Por la acción electroquímica que involucra al ion cloruro en presencia de oxígeno [2].

La corrosión de los metales en presencia de un ambiente húmedo se puede decir que es un proceso tanto de reducción como de oxidación el cual se da electroquímicamente por la presencia de distintas fases en la superficie metálica, esto ocasiona que el metal se deteriore y que sus propiedades disminuyan. Esto da origen a la formación de la celda electroquímica; este proceso se puede ver en la figura V. 1.

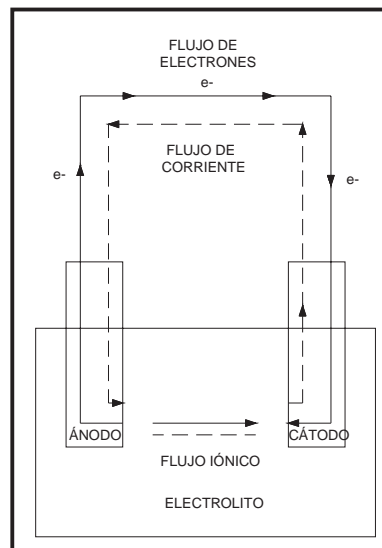


Figura V. 1. Celda Electroquímica

Para que pueda ocurrir la celda electroquímica es necesario que existan las zonas siguientes:

Zona anódica (ánodo). Es la superficie metálica donde se lleva a cabo la oxidación. En esta zona hay una liberación de electrones debido al paso del metal a su forma iónica.

Zona catódica (cátodo). Es la superficie metálica donde se lleva a cabo la reacción de reducción, aquí los electrones que se producen en el ánodo se combinan con determinados iones presentes en el electrolito. En este proceso hay una ganancia de electrones. En el cátodo se cierra el circuito eléctrico a través de un conductor externo.

Electrolito. Es la sustancia que sirve como intermediaria para que las cargas eléctricas se transporten por un flujo de iones. Esta sustancia provoca una diferencia de potencial entre los dos electrodos lo que provoca un flujo de electrones desde el ánodo hasta el cátodo [6].

Conductor metálico. Es un cable externo el cual conecta eléctricamente a los electrodos, es decir que transporta los electrones desde el ánodo hasta el cátodo.

Como ya se ha dicho, durante la reacción de oxidación hay una pérdida de electrones en el ánodo, los cuales son utilizados por el cátodo, esto es necesario para que ocurra la reducción.

Este proceso lo podemos ver en las estructuras de concreto armado, ya que el concreto actúa como el electrolito y las zonas anódica y catódica se encuentran en la superficie del acero, con ello se tiene lo necesario para formar la celda electroquímica.

Entre el metal y el electrolito podemos encontrar una zona intermedia llamada interfase, la cual es la región en la que se llevan a cabo las reacciones de oxidación y reducción. A esta fase también se le conoce con el nombre de capa electroquímica y es eléctricamente neutra.

En la interfase metal/solución ocurre una reacción química heterogénea, en la que hay una transferencia electrónica con producción neta de corriente, y se denomina proceso electródico.

En la interfase metal/disolución hay una separación de cargas causada por un campo eléctrico en el espacio entre la capa cargada y la diferencia de potencial a través de los extremos, que facilita el paso de los electrones en la interfase durante las reacciones de electrodo.

En la disolución se forman tres zonas iónicas, esto es para compensar el exceso de cargas en el electrodo metálico la cual se muestra en la figura V. 2.[6]

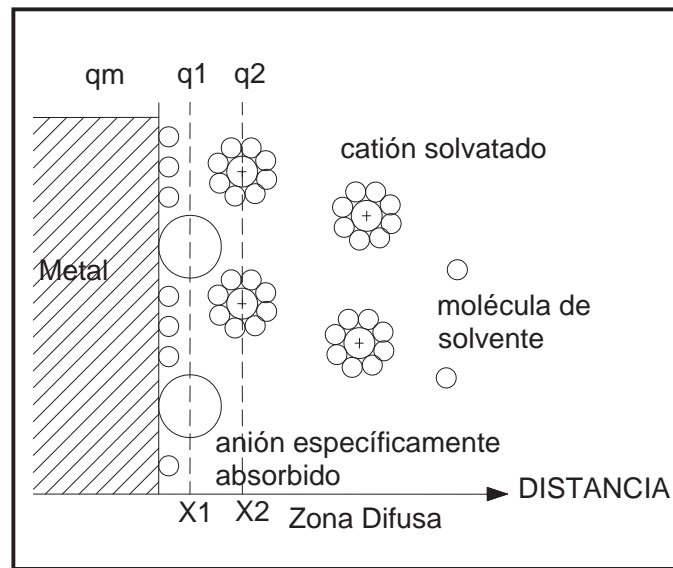


Figura V. 2 Doble capa electroquímica [6].

1. Una capa de iones, que se encuentran adsorbidos en la superficie del electrodo metálico es el plano de la mayor aproximación, llamado plano interno de Helmholtz (IHP) (q_1).
2. La siguiente capa, es donde se encuentran la mayoría de los cationes y algunos aniones. Este plano pasa por los centros de los iones solvatados más próximos a la superficie metálica y es llamado plano externo de Helmholtz (OHP) (q_2).
3. La otra capa contiene cargas mixtas que se extienden dentro del cuerpo de la solución y se le denomina zona difusa.

El electrodo metálico (q_m) debe ser igual a la suma de las cargas (q), pero con signo contrario.

A la carga de la capa difusa se denomina q_d , mientras que la q^i es una densidad de carga adsorbida en la zona interna y colocada sobre la superficie metálica la cual es una densidad superficial expresada en $\mu\text{coulomb}/\text{cm}^2$. Las variables que se presentan en la estructura de la interfase son [6]:

Concentración. Entre más alta sea la concentración iónica en la disolución más se favorece la formación de una estructura rígida (o de Helmholtz); y si esta disminuye la estructura será de tipo difuso.

Carga o potencial. Si aumenta la q_m (carga del electrodo) o potencial, se originará con mayor facilidad una estructura de Helmholtz, debido a las interacciones entre la q_m y los iones de la disolución.

Temperatura. Un aumento de la temperatura favorece la agitación térmica y por lo tanto la estructura difusa [6].

Podemos considerar dos tipos de interfase:

Interfase polarizable idealmente. Es aquella que tiene un sistema que al aplicarle una corriente varía su potencial. No existe paso de cargas a través de ella, por lo cual no puede ser utilizado como sistema de referencia. Su resistencia de transferencia es muy grande y tiende a infinito, el caso ideal es $R = \infty$.

Interfase no polarizable idealmente. Es el sistema que al hacerle pasar una corriente no afectará su potencial, existe paso de cargas a través de ella, está en equilibrio termodinámico y puede ser empleada como sistema de referencia, tiene una resistencia de transferencia muy pequeña, el caso ideal es $R = 0$. Este tipo de interfase es la que tienen los electrodos de referencia [7].

Debemos decir que sin la presencia tanto de oxígeno como de humedad la corrosión no se desarrolla, y si existe muy poco de ambos se desarrolla muy lentamente. Aunque estas dos partes también pueden ayudar en cierta medida a aumentar la capa pasivante, y a su vez cuando las armaduras se corroen activamente se acelera este proceso gracias a la ayuda de estos elementos.

V. 2. TIPOS DE CORROSIÓN

Según Fontana[1], existen diferentes tipos de corrosión de acuerdo a la apariencia física, estos diferentes tipos que se pueden presentar son los siguientes:

V. 2. 1. Corrosión Localizada

a. Corrosión por Picaduras

Las picaduras se forman por la disolución localizada de la película pasiva. Típicamente resultan del ingreso de los iones cloruro al medio, esto puede ser por dos razones, una de ellas puede ser por agentes exteriores o porque fueron incorporados en la masa del concreto.

Esto ayuda a que se forme una celda de corrosión en la cual se encuentran tanto una zona pasiva intacta, la cual actúa como cátodo, en esta área se reduce el oxígeno y otra zona en la que se ha perdido la película, que actúa como ánodo

b. Corrosión en Espacios Confinados

Esta corrosión ocurre cuando sobre la superficie del metal existe un espacio resguardado que impide el acceso continuo de oxígeno, con lo cual se pueden crear celdas diferenciales de oxígeno que inducen a la corrosión [2].

Son varias las circunstancias para que se induzca la corrosión por este medio. Una de ellas es por la inyección de grietas con material epóxico, donde ya el medio agresivo ha llegado al refuerzo, es en esta zona donde la corrosión se acelera por la falta de acceso de oxígeno. Otro caso puede ser la corrosión del acero de refuerzo con revestimientos, como por el ejemplo en el caso de uso de

epóxicos, cuando la adhesión entre éste y el acero se ha disminuido. Aunado a esto, si hay iones cloruro en el concreto, estos se pueden acumular en el espacio que se forma entre el recubrimiento y el acero. Esto provoca que el pH que se encuentra en esta zona disminuya y contribuya a la aceleración de la corrosión del acero por un proceso autocatalítico, similar al de la corrosión por picadura, todo esto ayuda a perder la adherencia.

c. Corrosión Bajo Tensión

Este tipo de corrosión se da cuando ocurren esfuerzos de tracción sobre el acero y actúa un medio agresivo en él. Solo que habitualmente ocurre en los concretos pre o postensado, donde se utilizan aceros de alta resistencia debido, a la presencia de hidrógeno atómico difundido a través del metal. Este tipo de corrosión se asocia con una mala calidad del concreto (mal relleno de las vainas) [1].

d. Corrosión por Corrientes de Interferencia

A estas corrientes también se les llama vagabundas, erráticas o de fuga, se definen como las corrientes que fluyen en una estructura y que no forman parte del circuito eléctrico/celda electroquímica específica. Para que ocurra este tipo de corrosión debe haber un intercambio de corriente entre una estructura metálica y un medio electrolítico. La corriente continua tiene un efecto mayor sobre la corrosión, ya que fluye en un solo sentido. En cambio, la corriente alterna, causa un efecto mucho menor, ya que su corriente la invierte alrededor de una centena de veces por segundo [2].

Algunas de las corrientes de este tipo son: sistemas con potencia eléctrica (trenes eléctricos); máquinas de soldar; corrientes telúricas (asociadas a la actividad solar

y al campo magnético de la tierra). Las corrientes que van sobre un medio electrolítico, sin importar la fuente, son manifestaciones de diferencias de voltaje.

Cuando el acero se encuentra en estado pasivo dentro del concreto y no ha sido contaminado por cloruros, esta corriente de interferencia no produciría ningún daño al refuerzo. Caso contrario sería si el concreto contiene cloruros, ya que la corriente aceleraría el proceso de corrosión [2].

V. 2. 2. Corrosión Uniforme/Generalizada

Este tipo de corrosión se produce gracias a la carbonatación del concreto y/o a la presencia de iones cloruro, ya que lo que ocasionan es una pérdida general de la capa pasiva que cubre el acero. Pero estas causas no son las únicas que la podrían producir, también se puede dar la lixiviación del concreto que a su vez se produce por la percolación y/o lavado por aguas puras o ligeramente ácidas [2].

V. 2. 3. Corrosión Galvánica

Este tipo de corrosión se da cuando existen dos tipos de metales en el medio electrolítico. En lo que respecta al acero embebido en el concreto, este proceso se da cuando en alguna zona se dañe o no se forme la capa pasiva que rodea al acero. Esta zona actuará como un ánodo frente al resto del material, donde permanece la pasivación, el cual actuará como cátodo. Otra forma en la que se podría dar este proceso es cuando el refuerzo se encuentra en contacto con otros conductores más nobles. Podemos decir que en general, esto se asocia al funcionamiento de una macrocelda. Como ejemplo podemos decir que un caso típico es cuando las armaduras exteriores se corroen cuando los cloruros ingresan en ellas, mientras que las armaduras interiores permanecen pasivas [2].

V. 3. MEDICIÓN DEL POTENCIAL

El potencial electroquímico es importante para determinar qué metal se está comportando como ánodo y cual como cátodo. Esto es debido a que las zonas que actúan catódicamente presentan un potencial más positivo de acuerdo a la serie electromotriz y las zonas que actúan anódicamente muestran un potencial más negativo.

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

No obstante que la medición del potencial es un indicativo de la actividad electroquímica del refuerzo, no es posible saber con precisión la velocidad a la que se está corroyendo, para ello es necesario estudiar la cinética del sistema concreto-metal [6].

V.4. CINÉTICA DE CORROSIÓN

La cinética estudia la velocidad con que ocurre un proceso de corrosión, es decir qué cantidad de un metal por unidad de tiempo se está disolviendo en un medio dado.

En electroquímica, al flujo de electrones generado en las reacciones de disolución (oxidación), que es igual al flujo de electrones consumidos en la reacción de reducción, se le llama densidad de corriente de intercambio i_0 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), siendo ésta una característica de un metal en equilibrio [6].

VI. EL CONCRETO Y EL ACERO DE REFUERZO

VI. 1. ANTECEDENTES HISTORICOS DEL CONCRETO

Desde la antigüedad el hombre ha buscado un espacio para vivir cómodamente, con seguridad y la mayor protección posible. Desde que el ser humano supero la época de las cavernas, ha aplicado sus mayores esfuerzos a delimitar su espacio vital, satisfaciendo primero sus necesidades y después levantando construcciones con requerimientos específicos.

Templos, palacios, museos, puentes y algunos caminos, son resultado del esfuerzo que constituye las bases para el progreso de la humanidad.

Se sabe que el pueblo egipcio ya utilizaba un mortero (mezcla de arena con cemento y agua) para unir los bloques y losas de piedra en sus asombrosas construcciones.

Los griegos y romanos descubrieron que ciertos depósitos volcánicos, mezclados con caliza y arena producían un mortero de gran fuerza, capaz de resistir la acción del agua, dulce o salada. Los romanos encontraron en un lugar llamado Pozzuoli un material volcánico muy apropiado para sus construcciones con mortero, actualmente se le conoce como puzolana.

Hacia el año 700 a. C. los etruscos utilizan mezclas de puzolana y cal para hacer un mortero. Ya en año 100 a. C. los romanos utilizaban mezclas de puzolana y cal para hacer hormigón de resistencias a compresión de 50 kg/cm^2 (5 Mpa) [8].

Hasta el año de 1750 solo se utilizan los morteros de cal y materiales puzolánicos. Hacia el 1750 – 1800 se investigan mezclas calcinadas de arcilla y caliza. Smeaton compara en el año de 1756 el aspecto y dureza con la piedra Portland al sur de Inglaterra; 40 años más tarde, Parker fábrica cemento natural aplicándose

entonces el vocablo “cemento” (anteriormente se interpreta como “caement” a toda sustancia capaz de mejorar las propiedades de otras). Vicat explica en 1818 de manera científica el comportamiento de estos conglomerantes. En 1824, Aspadin patenta el cemento Portland dándole este nombre por motivos comerciales, en razón de su color y dureza que le recuerdan a las piedras Portland. Hasta la aparición del mortero hidráulico que auto endurecía, el mortero era preparado en un mortarium (sartén para mortero) por percusión y rotura, tal como en la industria química y farmacéutica.

Entre los años de 1825 y 1872, aparecen las primeras fábricas de cemento en Inglaterra, Francia y Alemania. En el año de 1880 se estudian las propiedades hidráulicas de la escoria de alto horno. En el año de 1890 aparecen las primeras fábricas de cemento en España. En el año de 1980 hay 1500 fábricas que producen cerca de 800 millones de toneladas por año. Hoy día el cemento es conglomerante más económico que se conoce. Mezclado adecuadamente con los áridos y el agua forma el hormigón o concreto, el cual es una roca artificial capaz de tomar variadas formas con unas prestaciones mecánicas a compresión muy importantes. Las resistencias a tracción pueden mejorarse con la utilización de armaduras (concreto armado) [8].

VI. 2. EL CONCRETO Y LOS DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO

El concreto es una roca artificial creada por el hombre, se compone de un aglutinante y agregados, es decir de cemento, agua, grava, arena y aire. El concreto tiene la propiedad de tener una alta resistencia a la compresión, pero esto le trae consigo ser poco resistente a la flexión, es por ello que se utiliza el acero para que este absorba esos esfuerzos en la estructura. Esta característica de ambos materiales los hace ser muy utilizados en la construcción de puentes y otras estructuras, como edificios, casas, etc. [8].

Como se dijo el concreto está integrado por cemento, el cual puede describirse como un material inorgánico con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, finamente pulverizado, que cuando se le agrega agua, tiene esta propiedad de fraguar y endurecer, en virtud de sus reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, conservará su resistencia y estabilidad [9].

La fabricación del cemento Portland se da en tres fases:

1. Preparación de la mezcla de las materias primas.
2. Producción del clinker.
3. Preparación del cemento.

El cemento se fabrica a partir del sulfato de calcio di-hidratado (yeso), del óxido de calcio (cal libre), de la magnesia (periclusa), del álcalis y del clinker, este último es el producto de la fusión a $1,500^{\circ}\text{C}$ de la mezcla de caliza (CaCO_3) y arcilla (Al_2O_3 , Fe_2O_3 + sílice). Todos estos compuestos reaccionan dando como resultado nuevas especies químicas que son los principales componentes del cemento.

Anteriormente en el mercado se clasificaba a los cementos de acuerdo a la norma NMX – C – 001, la cual se adaptaba a la norma C – 150 de la ASTM (American Society for Testing Materials), a continuación se dan los tipos de cemento de acuerdo a esta norma en la tabla VI. 1:

Tabla VI. 1. Tipos de cemento Portland [10].

CEMENTO	USO
Tipo I	Cemento de uso general.
Tipo II	Genera menor calor de hidratación que el tipo I y es más resistente al ataque por sulfatos. Se utiliza en grandes estructuras en las que el calor de hidratación puede provocar agrietamientos.
Tipo III	Cemento de alta resistencia a temprana edad y rápido fraguado. Es usado cuando se requiere alcanzar una elevada resistencia en pocos días.
Tipo IV	Presenta un calor de hidratación más bajo que el tipo III, se utiliza en construcciones de concreto masivo.
Tipo V	Cemento de alta resistencia a la acción de los sulfatos, se utiliza en estructuras que están en contacto con suelos de aguas freáticas de alto contenido de sulfatos y en hormigones con aguas negras domésticas concentradas.

En la actualidad la Norma Mexicana NMX – C414 – 2004, clasifica a los cementos de acuerdo al tipo de cemento, a la clase resistente y sus características especiales. Esto lo podemos ver en la tabla VI. 2 y VI. 3.

Tabla VI. 2. Clasificación de los cementos [11]

TIPO	DENOMINACIÓN	CLASE RESISTENTE	CARACTERÍSTICAS ESPECIALES
CPO	Cemento Portland ordinario.	20	RS Resistente a los Sulfatos
CPP	Cemento Portland Puzolánico.	30	BRA Baja Reactividad Alkali Agregado
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno.	30 R	BCH Bajo Calor de Hidratación
CPC	Cemento Portland Compuesto.	40	B Blanco
CPS	Cemento Portland Con Humo de Sílice.	40 R	--
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno.	--	--

Tabla VI. 3. Tipos de cemento y su descripción [9].

TIPO	DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN
CPO	Cemento Portland ordinario.	Es el cemento producido a base de la molienda del clinker Portland y usualmente, sulfato de calcio.
CPP	Cemento Portland Puzolánico.	Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta del clinker Portland, materiales puzolánicos y usualmente, sulfato de calcio.
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno.	Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker Portland, escoria de alto horno y usualmente sulfato de calcio.
CPC	Cemento Portland Compuesto.	Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker Portland, usualmente, sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En el caso de la caliza, este puede ser el único componente.
CPS	Cemento Portland Con Humo de Sílice.	Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta del clinker Portland, humo de sílice y usualmente sulfato de calcio.
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno.	Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker Portland, y mayoritariamente escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio.

Así mismo las cantidades de sus componentes son variadas, esto lo podemos ver en la tabla VI. 4, que a continuación se presenta.

Tabla VI. 4. Composición de los cementos [9]

TIPO	DENOMINACIÓN	COMPONENTES					
		CLINKER	PRINCIPALES				MINORITARIOS (2)
		Portland + yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales puzolánicos (3)	Humo de sílice	Caliza	
CPO	Cemento Portland ordinario	95 – 100	---	---	---	---	0 – 5
CPP	Cemento Portland puzolánico	50 – 94	---	6 – 50	---	---	0 – 5
CPEG	Cemento Portland con escoria granulada de alto horno	40 – 94	6 – 60	---	---	---	0 – 5
CPC	Cemento Portland compuesto (4)	50 – 94	6 – 35	6 – 35	1 – 10	6 – 35	0 – 5
CPS	Cemento Portland con humo de sílice	90 – 99	---	---	1 – 10	---	0 – 5
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno	20 – 39	61 – 80	---	---	---	0 – 5

Nota 1. Los valores de la tabla representan el % masa.

Nota 2. Los componentes minoritarios deben ser uno o más de los componentes principales, a menos que estén incluidos ya como tales en el cemento.

Nota 3. Los materiales puzolánicos incluyen: puzolanas naturales, artificiales y/o cenizas volantes.

Nota 4. El cemento Portland compuesto debe llevar como mínimo dos componentes principales, excepto cuando se adicione caliza, ya que ésta puede estar en forma individual en conjunto con clinker + yeso.

En lo que respecta a su resistencia a la compresión podemos decir que se subdivide en dos, las cuales son la resistencia normal, la cual es a los 28 días, y se designa de acuerdo al tipo de cemento seguido por los valores 20, 30 ó 40. Otro tipo de resistencia es la rápida, la cual se presenta a los 3 días, para la especificación de este tipo de cemento se le agrega a la denominación la letra R seguida de la clase, es decir 30 R y 40 R. La resistencia que deben cumplir los cementos se muestran en la tabla VI. 5.

Tabla VI. 5. Resistencias a la compresión [9].

CLASE RESISTENTE	RESITENCIA A LA COMPRESIÓN (N/mm ²)			TIEMPO DE FRAGUADO (min)		ESTABILIDAD DE VOLUMEN EN AUTOCLAVE (%)	
	3 DÍAS	28 DÍAS		Inicial	Final	Expansión	Contracción
	MÍNIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	Mínimo	máximo	máximo	máximo
20	-	20	40	45	600	0.80	0.20
30	-	30	50	45	600	0.80	0.20
30 R	20	30	50	45	600	0.80	0.20
40	-	40	-	45	600	0.80	0.20
40 R	30	40	-	45	600	0.80	0.20

Nota 1. La resistencia inicial de un cemento es la resistencia mecánica a la compresión a los 3 días. Para indicar que un tipo de cemento debe cumplir con una resistencia inicial especificada, se le agrega la letra R después de la clase. Solo se definen valores de resistencia inicial a 30 R y 40 R.

A continuación se mostrará la tabla VI. 6, la cual hace una comparativa entre los cementos de la norma actual con la norma cancelada.

Tabla VI. 6. Comparativa del cemento con otras Normas [11].

NMX – C – 414 – ONNCCE (VIGENTE)	NMX – C – 001 (CANCELADA) NORMA ASTM C - 150
CPO 30, CPO 30R, CPC 30 y CPC 30R	TIPO I
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BCH y RS.	TIPO II
CPO 40, CPO 40R y CPC 40R	TIPO III
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BCH.	TIPO IV
Cualquier cemento que cumpla la característica especial RS.	TIPO V
CPO ó CPC que cumpla con la característica especial B.	BLANCO
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BRA.	ESPECIAL, BAJO ÁLCALI TODOS LOS TIPOS

Pasando ahora del lado de los agregados, podemos decir que anteriormente se les consideraba materiales inertes, los cuales eran usados por razones económicas, pero ahora se les considera como aquel material el cual es capaz de

proporcionar mayor estabilidad volumétrica y más durabilidad al concreto. Estos materiales no son realmente inertes y sus propiedades físicas, térmicas y químicas influyen en el desempeño del concreto, es decir en su resistencia y durabilidad.

El agua también juega un papel importante en el concreto, ya que esta al estar combinada con el cemento experimenta una reacción química, la cual hace que se endurezca y fragüe. Es por ello que la cantidad de agua necesaria para que se lleve a cabo esta reacción se encuentra entre el 40% del peso del cemento. Una parte de esta agua (23%) se combina químicamente para dar productos de hidratación y el resto se absorbe en la superficie del gel que se forma en los poros. Cuando esta agua se encuentra en exceso provoca que el concreto endurecido tenga un alto grado de porosidad y permeabilidad, lo cual no es muy benéfico para las obras civiles.

Es por ello que se debe cuidar la relación agua/cemento que no es otra cosa que la cantidad de agua utilizada con respecto al peso de cemento. Esta relación juega un papel muy importante en la preparación del concreto, ya que la mezcla debe ser lo suficientemente semifluida, para manejarla cómodamente. La importancia que esto tiene radica en que entre menor contenido de agua la pasta estará más compacta, es decir que se reducirán la cantidad de poros existentes en ella. Este grado de compactación es importante para el proceso de corrosión del acero, ya que entre más poroso sea el elemento, mayor será la penetración de líquidos y gases. La velocidad de penetración del oxígeno y de los iones cloruro en el concreto es menor cuando se reduce la relación agua/cemento y por ende la porosidad.

Cuando uno realiza una buena mezcla de concreto y debido a su pH (12.5 – 13.5), hace que se mantenga el acero de refuerzo en un estado de pasividad, en lo que respecta a la corrosión, lo cual garantiza una protección química que prolonga su vida útil [6].

La pasta de cemento pasa por dos etapas las cuales son, el fraguado y el curado, que es donde se lleva a cabo la hidratación, que es esencial para una estructura de concreto, ya que con ello alcanza sus propiedades mecánicas.

Podemos decir que el fraguado es el cambio que hay del estado fluido al estado rígido, y es causado por la hidratación de algunos de los componentes del cemento, los que más rápido reaccionan son el Aluminato tricálcico (C_3A) y el Silicato tricálcico (C_3S).

El fraguado se divide en fraguado inicial, el cual es un rápido aumento en temperatura y el fraguado final al máximo de temperatura.

Para mantener la humedad del concreto hasta que llegue a su resistencia adecuada, es necesario curarlo, es decir humedecerlo constantemente, con el fin de prevenir la evaporación del agua. El propósito del curado es mantener el concreto saturado, esto para que los productos de hidratación del cemento llenen los espacios de la pasta fresca que en un inicio se encontraban llenos de agua.

Este curado, también ayuda a proteger al acero, ya que se forma una capa pasiva protectora en la superficie de éste, esto gracias a la presencia de especies alcalinas, como KOH, NaOH y $Ca(OH)_2$ [6].

VI. 3. MECANISMOS DE LA ACCIÓN CEMENTANTE

VI. 3. 1. Reactivos de los Componentes Anhídridos

Los variados silicatos y aluminatos de calcio anhídridos varían en reacción con el agua a temperatura ambiente. Así el C_3S y el CA , los principales constituyentes del cemento Portland ordinario, y de los cementos alumínicos respectivamente, reaccionan relativamente rápido y son hidráulicamente resistentes. Los aluminatos

C_3A y $C_{12}A_7$ reaccionan rápidamente pero en pastas hechas de las perfecciones de bajos esfuerzos. Algunos otros componentes, tal como el silicato cálcico (β – CS), silicato alumínico di cálcico (C_2AS) y hexálmunato cálcico (CA6) son inertes a temperatura de cuarto.

Las fases principales o compuestos de los cementos tienen composiciones que difieren de la ideal. Estas variaciones en la composición parecen influir en la reactividad. *Por ejemplo C_3S del cemento Portland contiene pequeñas cantidades de Mg^{2+} y Al^{3+} que influyen en la reactividad [12].*

VI. 3. 2. Productos Formados en la Hidratación

La hidratación en el concreto es la reacción química que el agua tiene en combinación con los componentes del cemento, dando como consecuencia el fraguado y el endurecimiento de este. Las reacciones que provocan esto se les conoce con el nombre de reacciones de hidratación, ya que forman hidratos.

Los componentes del cemento pueden reaccionar con el agua de dos maneras diferentes:

- Por hidratación real: por adición y adicción directa de moléculas de agua.
- Por hidrólisis.

En la tabla VI. 7, se muestra un resumen de los productos formados en la hidratación del cemento [12].

Tabla VI. 7. Principales productos de hidratación de algunos cementos hidráulicos[12].

TIPO DE CEMENTO	PRODUCTOS COLOIDALES (< 0.1 μm)	PRODUCTOS SUBMICROCISTALINOS (0.1 – 1 μm)	PRODUCTOS MICROCISTALINOS (>1 μm)
Cemento Portland (curado normal a 20° C)	Gel Tobermorita (aproximadamente C _{1.7} SH ₂) y probablemente Ca(OH) ₂	Ca(OH) ₂ y varias fases de contenido de Al ³⁺ , Fe ³⁺ y SO ₄ ²⁻	Ca(OH) ₂
Materiales contenido sílice – cemento Portland y sílice – cal en autoclave	Tobermoritas más cristalizadas	Tobermorita de 11 Å (Ca ₅ (Si ₃ O ₉ H) ₂ .4H ₂ O)	–
Cementos aluminosos (curado normal a 20° C)	Al(OH) ₃	CAH ₁₉ (CaA ₁₂ (OH) ₈ .6H ₂ O) y algo de C ₂ AH ₃	–
Cementos supersulfatados	Gel tobermorita	Entringita (CaA ₁₂ (OH) ₁₂)(SO ₄) ₃ .26H ₂ O)	–
Yeso cocido (mehihidrato)	–	–	Yeso (CaSO ₄ .2H ₂ O)

Composición Química

Los productos que se mencionan en la tabla V. 7., incluyen un rango de sales hidratadas, sales básicas, simples y complejos hidróxidos, y otros componentes. Todos contienen los elementos de agua, y pueden hallarse en estado de moléculas o como iones oxhidrilos unidos por enlaces iónicos o covalentes o por aniones con cadenas indefinidas [12].

Tamaño de la Partícula

En el tamaño de la partícula, los rangos de los productos varían de coloides a cristales, algunas veces visibles bajo el microscopio. Los cementos hidráulicos pueden ser agrupados dentro de tres grupos, los cuales son:

- a) Acción cementante casi debido a la formación de productos coloidales. El curado de cemento Portland en temperatura ambiente cae dentro de esta categoría; el endurecimiento de la pasta parece estar atribuido casi

completamente a la formación de gel de tobermorita. Los productos que están en una pasta de C_3S son solamente el gel de tobermorita y $Ca(OH)_2$; el Al^{3+} , Fe^{3+} y SO_4^{2-} contenidas en las fases de la pasta del cemento Portland no juegan un papel importante, excepto quizás a muy tempranas edades.

- b) Acción cementante principalmente o casi principalmente a la formación de cristales. Las pastas de cemento endurecido están dentro de esta categoría; la examinación microscópica de algunas pastas de cemento endurecido, muestra que están formadas por masas muy compactas de cristales.
- c) Acción cementante debido a la acción de los productos coloidales y la cristalización. Con algunos de tipos de cemento, los productos coloidales y los productos cristalinos parecen contribuir significativamente en el endurecimiento del concreto. Así en cementos supersulfatados, el esfuerzo a edades tempranas parece ser debido principalmente a la formación de etringita, mientras que a edades tardías el gel de tobermorita juegan un papel importante cada vez más.

Los cementos que contienen una alta proporción de productos cristalinos son más estables que los que contienen principalmente productos coloidales. De igual forma, los cementos ricos en productos cristalinos presentan mejor resistencia al ataque químico [12].

Forma de la Partícula

La forma de las partículas en los productos de hidratación es también muy variable. La etringita tiene *cristales circulares*, mientras que el gel de tobermorita contiene *partículas fibrosas pequeñas y laminillas irregulares* aun menores, lo cual

va asociado con excelentes propiedades mecánicas. La morfología de CAH_{10} no se conoce con certeza. C_3AH_6 , que está formada en el curado de cementos aluminíticos por encima de los $40^{\circ} C$ y es menos satisfactorio como un agente cementante que CAH_{10} , es cúbico y con formas de cristales equidimensionales aproximadamente. Esto es posible por la composición de la forma de los cristales de tamaño similar y de su forma pero con una diferencia notable en sus valores como agentes cementantes [12].

Estructura Superficial

Un factor que tiene mucha importancia en la determinación de la habilidad de un producto de hidratación que actúa como un agente cementante es la estructura superficial. Las fuerzas que provocan la adhesión entre las partículas en las pastas endurecidas no se conocen con exactitud, pero es razonable suponer que son resistentes para estos compuestos donde se tienen superficies cuya coordinación entre los átomos y los iones es insatisfactoria o donde hay una diferencia marcada en la carga eléctrica.

Circunstancias de Formación

Se considera que este es uno de los factores más importantes en las circunstancias de formación de productos de hidratación. Si la formación ocurre bajo condiciones que no conllevan la alteración de la estructura pre-existente, las partículas de diferentes tamaños y formas pueden proporcionar materiales de alta resistencia. Por ejemplo, la etringita ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) cuando se forma en etapas iniciales en las pastas del cemento tiene un efecto positivo en el desarrollo de propiedades mecánicas, por el contrario, cuando se forma en una pasta endurecida, provoca la destrucción completa del material [12].

VI. 3. 3. Teorías del Fraguado y el Endurecimiento

En la etapa de hidratación se llevan a cabo dos fenómenos los cuales se denominan fraguado y endurecimiento, para comprenderlos mejor a continuación se da una pequeña descripción de cada uno.

Fraguado. Es un cambio de consistencia que se presenta en una pasta de cemento al pasar de un estado semisólido a un estado sólido o rígido (Tiempo de duración: 10 hrs.). Tiene dos etapas:

- Fraguado inicial (45 a 65 minutos).
- Fraguado final (10 hrs).

Endurecimiento. Es el incremento de resistencia que se desarrolla en la pasta de cemento fraguada, durante un lapso de tiempo definido, que para efectos de construcción de estima en 28 días.

Hipótesis de la Cristalización

Inicialmente fue creada por Lavoisier en el año de 1764, el cual mostraba que el fraguado de los yesos de Paris podía ser atribuido a la rehidratación del material dado por el yeso; el reporto esto “ocurre una rápida e irregular cristalización, y los pequeños cristales que son formados son entrelazados entre sí, esto da endurecimiento muy grande como resultado” [12].

El primer intento detallado a la explicación del fraguado y el endurecimiento de los cementos hidráulicos fueron hechos por Le Chatelier en 1887. Le Chatelier suponía que los cementos disueltos en agua daban una solución que eran relativamente supersaturados a los productos de hidratación. Ahora se sabe que esta solución forma cristales que se precipitan, que interconectan en la manera

descrita por Lavoisier. El esfuerzo de la pasta endurecida depende de la cohesión interna de los cristales, del producto de hidratación y de la adhesión entre ellos [12].

La Hipótesis de Gel

En 1893 Michaëlis^[9] atribuyó el endurecimiento del cemento hidráulico a la formación de un gel. Recién se formaba el gel, era blando y contenía mucha agua en esta etapa, había granos de cemento que todavía no reaccionaban. En la hidratación, estos granos absorbían el agua del gel, que por tal motivo se endurecía y se hacía impermeable. Michaëlis^[9] reconoció que en la hidratación del cemento Portland, también se originan productos cristalinos, pero éstos juegan un papel poco importante en el fraguado y endurecimiento [12].

La Naturaleza del Gel

Investigaciones actuales principalmente aceptan a las pastas endurecidas de cemento Portland como geles, y esto es por lo tanto útil para resumir las ideas existentes en la estructura de gel. Hermans definió a los geles como cuerpos que satisfacían los siguientes criterios:

- a) Son sistemas dispersos, coherentes, de naturaleza coloidal, de dos componentes por lo menos.
- b) Muestran propiedades características del estado sólido
- c) El componente disperso y el medio dispersante, se extienden de una manera continua a través de todo el sistema [12].

Las partículas del componente disperso pueden ser cristalinas o amorfas, por ejemplo pueden ser glóbulos amorfos, partículas cristalinas, fibras cortas o largas

cadena macromoleculares (figura VI. 1). Lo esencial es que son capaces de adherirse para formar un armazón abierto e irregular, en el que se embeben las moléculas del medio dispersante, soldándose en estructuras iónicas o covalentes.

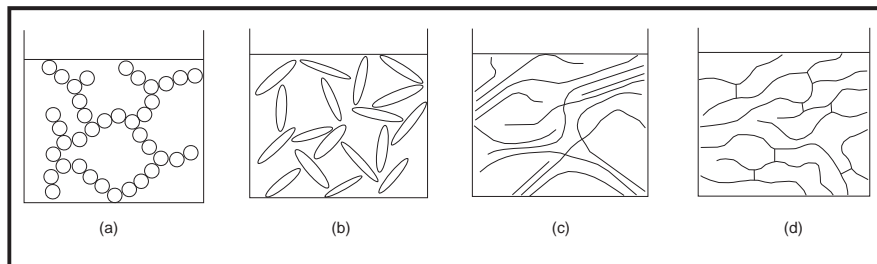


Figura VI. 1. Cuatro tipos de estructura de gel, se muestran diagramáticamente; la a) partículas de glóbulos amorfos; b) partículas cristalinas; c) partículas de fibras cortas y; d) partículas de largas cadenas macromoleculares.[12]

Tendencias Actuales

Por mucho tiempo después Le Chatelier y Michaëlis tenían puntos de sus tendencias hacia adelante, controversialmente existía como que era correcta. Bogue^[9] resumía la historia de estos controversistas. Más recientemente, la tendencia era de mirar bastante para una síntesis de las dos aproximaciones. Así Bernal^[9] propuso para esto que, las partículas en el gel de tobermorita tenía apreciable carácter cristalino; el concepto de Michaëlis de la pasta de cemento endurecida como una partícula de gel hidratada era correcta, pero el material podía también ser estimado como una masa muy pequeña, con cristales interconectados. Más tarde, en 1926, Baykoff sugirió que el fraguado podía estar atribuido a la formación de un gel, pero el proceso subsiguiente de endurecimiento era debido a la formación de productos cristalinos.

No hay un acuerdo acerca de los detalles del proceso que provoca el fraguado y endurecimiento, sin embargo, las tendencias actuales es considerar una síntesis de la hipótesis de cristalización y la de formación de gel y la mayoría de los investigadores aceptan esto en la actualidad [12].

El resultado inicial de la mezcla del cemento con el agua produce una dispersión; la relación agua/cemento (a/c) necesaria para producir una pasta (0.3 – 0.7 w/w), en la que los granos de cemento no están aún en trabazón muy fuerte (figura VI. 2a). La reacción con el agua produce rápidamente una capa superficial de productos de hidratación sobre cada grano. Esto ocupa espacio en parte a costa de los granos, y en parte al líquido (figura VI. 2b). Las partículas de los productos de hidratación son de dimensiones coloidales (10 – 1000 Å), pero también se forman algunos cristales mayores ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ y fases que contienen Al^{3+} , Fe^{3+} y SO_4^{2-}). La solución rápidamente se satura con Ca^{2+} , OH^- , SO_4^{2-} , y cationes alcalinos. Al progresar la reacción, las capas de los productos de hidratación se extienden y empiezan a tocarse, de tal forma que se forma un gel en los espacios inter granulares (figura VI. 2c). Esto corresponde a la fase del fraguado. Cuando la reacción prosigue, las partículas existentes entre los granos aumentan y se van apretando hasta que el material se considera como una masa de partículas en mutuo contacto (figura VI. 2d)[12].

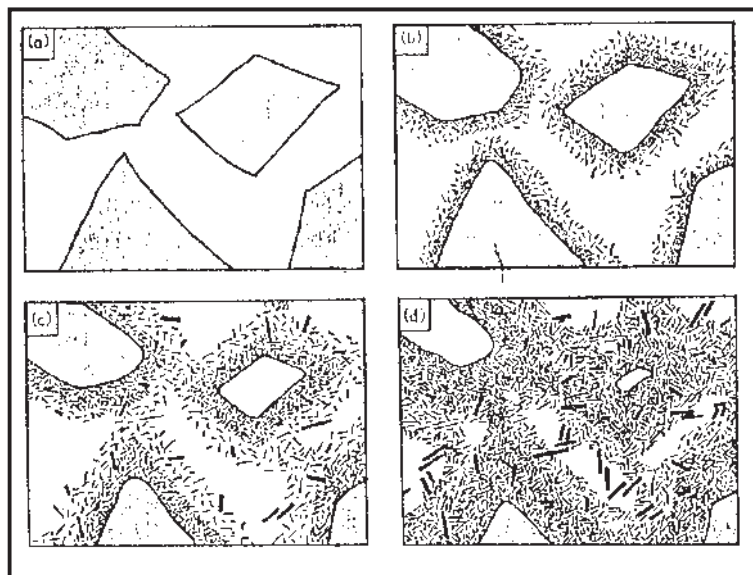


Figura VI. 2. Representación esquemática de las cuatro fases en el fraguado y endurecimiento del cemento Portland. Representación del diagrama simplificado de la posible secuencia de cambios. a) Dispersión de los granos del clinker sin reaccionar con el agua. b) Después de unos minutos, los productos de hidratación crecen hacia adentro y hacia fuera de cada grano. c) Después de unas horas las capas que recubren los diferentes granos de clinker se juntan, volviéndose así el conjunto un gel continuo (fraguado). d) Después de unos días, ocurre un apretujamiento progresivo de partículas en mutuo contacto (endurecimiento) [12].

VI. 4. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL ACERO

Los minerales ferrosos, son una mezcla de óxidos de hierro y una cantidad variable de otros compuestos de donde la separación del hierro no es nada fácil. Es probable que de manera accidental en la antigüedad se hayan descubiertos pequeños trozos de hierro en residuos de fogatas, donde se quemó leña en abundancia en contacto con rocas de alto contenido férrico [13].

No se conoce con exactitud la fecha en que se descubrió la técnica de fundir mineral de hierro para producir un metal susceptible de ser utilizado. Los primeros utensilios de hierro descubiertos por los arqueólogos en Egipto datan del año 3000 a.C., y se sabe que antes de esa época se empleaban adornos de hierro. Los griegos ya conocían hacia el 1000 a.C. la técnica, de cierta complejidad, para endurecer armas de hierro mediante tratamiento térmico [14].

La acción del monóxido de carbono producido durante la combustión de la leña pudo haber servido para retirar el oxígeno de los óxidos de hierro. Por este mecanismo, las rocas se convertirían en piezas de hierro poroso que ahora se conoce como hierro esponja. Cuando el hierro esponja se encuentra al rojo vivo en contacto con las brasas, en los poros se acumula una escoria líquida que los antiguos eliminaban martillando al hierro esponja en un yunque. El producto obtenido era un hierro forjado bastante puro.

Hasta este proceso solo se tenía hierro, no acero. En el año 1200 a. C., ya se sabía cómo convertir la superficie del hierro forjado en acero. Esto lo hacían gracias a que el producto que ellos fabricaban lo empacaban en carbón de leña molido. El paquete se mantenía en un recipiente al rojo vivo durante varias horas para que el carbono de la leña se difundiera hacia el interior del producto, lo cual formaba una capa dura de acero (hierro + carbono) alrededor de una matriz de hierro [13].

Las aleaciones producidas por los primeros artesanos del hierro (y, de hecho, todas las aleaciones de hierro fabricadas hasta el siglo XIV d.C.) se clasificarían en la actualidad como hierro forjado. Para producir esas aleaciones se calentaba una masa de mineral de hierro y carbón vegetal en un horno o forja con tiro forzado. Ese tratamiento reducía el mineral a una masa esponjosa de hierro metálico llena de una escoria formada por impurezas metálicas y cenizas de carbón vegetal. Esta esponja de hierro se retiraba mientras permanecía incandescente y se golpeaba con pesados martillos para expulsar la escoria y soldar y consolidar el hierro. El hierro producido en esas condiciones solía contener un 3% de partículas de escoria y un 0.1% de otras impurezas. En ocasiones esta técnica de fabricación producía accidentalmente auténtico acero en lugar de hierro forjado. Los artesanos del hierro aprendieron a fabricar acero calentando hierro forjado y carbón vegetal en recipientes de arcilla durante varios días, con lo que el hierro absorbía suficiente carbono para convertirse en acero auténtico.

Después del siglo XIV se aumentó el tamaño de los hornos utilizados para la fundición y se incrementó el tiro para forzar el paso de los gases de combustión por la carga o mezcla de materias primas. En estos hornos de mayor tamaño el mineral de hierro de la parte superior del horno se reducía a hierro metálico y a continuación absorbía más carbono como resultado de los gases que lo atravesaban. El producto de estos hornos era el llamado arrabio, una aleación que funde a una temperatura menor que el acero o el hierro forjado. El arrabio se refinaba después para fabricar acero [14].

La producción moderna de acero emplea altos hornos que son modelos perfeccionados de los usados antiguamente. El proceso de refinado del arrabio mediante chorros de aire se debe al inventor británico Henry Bessemer, que en 1855 desarrolló el horno o convertidor que lleva su nombre. Desde la década de 1960 funcionan varios mini hornos que emplean electricidad para producir acero a

partir de chatarra. Sin embargo, las grandes instalaciones de altos hornos continúan siendo esenciales para producir acero a partir de mineral de hierro [14].

VI. 5. EL ACERO Y LOS TIPOS DE ACERO

El Acero es básicamente una aleación o combinación de hierro y carbono (alrededor de 0,05% hasta menos de un 2%). Algunas veces otros elementos de aleación específicos tales como el Cr (Cromo) o Ni (Níquel) se agregan con propósitos determinados [15].

El carbono tiene una gran influencia en el comportamiento mecánico de los aceros. La resistencia de un acero simple con 0.5% de carbono es más de dos veces superior a la de otro con 0.1%. Si el contenido de carbono llega al 1%, la resistencia se triplica con respecto al nivel de referencia del 0.1%.

El carbono sin embargo, generalmente reduce la ductilidad del acero. La ductilidad es una medida de la capacidad de un material para deformarse, en forma permanente, sin llegar a la ruptura. Un acero de 0.1% de carbono es más de cuatro veces más dúctil que otro con 1% de carbono y dos veces más que un tercero con 0.5% de carbono [13].

Ya que el acero es básicamente hierro altamente refinado (más de un 98%), su fabricación comienza con la reducción de hierro (producción de arrabio) el cual se convierte más tarde en acero.

El hierro puro es uno de los elementos del acero, por lo tanto consiste solamente de un tipo de átomos. No se encuentra libre en la naturaleza ya que químicamente reacciona con facilidad con el oxígeno del aire para formar óxido de hierro - herrumbre. El óxido se encuentra en cantidades significativas en el mineral de

hierro, el cual es una concentración de óxido de hierro con impurezas y materiales térreos [15].

VI. 5. 1. Clasificación del Acero

Los diferentes tipos de acero se clasifican de acuerdo a los elementos de aleación que producen distintos efectos en el Acero :

Aceros al carbono

Más del 90% de todos los aceros son aceros al carbono. Estos aceros contienen diversas cantidades de carbono y menos del 1.65% de manganeso, el 0.60% de silicio y el 0.60% de cobre. Entre los productos fabricados con aceros al carbono figuran máquinas, carrocerías de automóvil, la mayor parte de las estructuras de construcción de acero, cascos de buques, somieres y horquillas [15].

Por su contenido de carbono, los aceros se clasifican como de bajo, medio y alto carbono. Las fronteras que separan a estos tipos de acero no están claramente definidas, aunque se entiende que los aceros de bajo carbono tienen menos del 0.25% de carbono en su aleación. Con ellos se fabrican las mejores varillas para refuerzo de concreto, las estructuras de edificios y puentes, la carrocería de los automóviles y las corazas de los barcos.

Los aceros de medio carbono, entre 0.25% y 0.6%, se emplean cuando se quiere mayor resistencia. Con estos aceros se hacen piezas para maquinarias como ejes y engranes. Los aceros de alto carbono, entre 0.6% y 1.2%, son de muy alta resistencia, pero con mucha fragilidad. Muchas herramientas son de esta aleación, entre ellas están los picos, palas, hachas, martillos, cinceles, cierras, etc. [13].

Existe otro tipo de acero, el cual es de ultra alto carbono, estos tienen una aleación del 1.5% de carbono [13].

Aceros Aleados

Estos aceros contienen una proporción determinada de vanadio, molibdeno y otros elementos, además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono normales. Estos aceros de aleación se pueden sub clasificar en:

- **Estructurales.** Son aquellos aceros que se emplean para diversas partes de máquinas, tales como engranajes, ejes y palancas. Además se utilizan en las estructuras de edificios, construcción de chasis de automóviles, puentes, barcos y semejantes. El contenido de la aleación varía desde 0,25% a un 6%.
- **Para Herramientas.** Aceros de alta calidad que se emplean en herramientas para cortar y modelar metales y no-metales. Por lo tanto, son materiales empleados para cortar y construir herramientas tales como taladros, escariadores, fresas, terrajas y machos de roscar.
- **Especiales.** Los Aceros de Aleación especiales son los aceros inoxidables y aquellos con un contenido de cromo generalmente superior al 12%. Estos aceros de gran dureza y alta resistencia a las altas temperaturas y a la corrosión, se emplean en turbinas de vapor, engranajes, ejes y rodamientos [15].

Aceros de Baja Aleación Ultrarresistente

Esta familia es la más reciente de las cuatro grandes clases de acero. Los aceros de baja aleación son más baratos que los aceros aleados convencionales ya que contienen cantidades menores de los costosos elementos de aleación. Sin embargo, reciben un tratamiento especial que les da una resistencia mucho mayor que la del acero al carbono. Por ejemplo, los vagones de mercancías fabricados con aceros de baja aleación pueden transportar cargas más grandes porque sus paredes son más delgadas que lo que sería necesario en caso de emplear acero al carbono. Además, como los vagones de acero de baja aleación pesan menos, las cargas pueden ser más pesadas. En la actualidad se construyen muchos edificios con estructuras de aceros de baja aleación. Las vigas pueden ser más delgadas sin disminuir su resistencia, logrando un mayor espacio interior en los edificios.

Aceros Inoxidables

Los aceros inoxidables contienen cromo, níquel y otros elementos de aleación, que los mantienen brillantes y resistentes a la herrumbre y oxidación a pesar de la acción de la humedad o de ácidos y gases corrosivos. Algunos aceros inoxidables son muy duros; otros son muy resistentes y mantienen esa resistencia durante largos periodos a temperaturas extremas. Debido a sus superficies brillantes, en arquitectura se emplean muchas veces con fines decorativos. El acero inoxidable se utiliza para las tuberías y tanques de refinerías de petróleo o plantas químicas, para los fuselajes de los aviones o para cápsulas espaciales. También se usa para fabricar instrumentos y equipos quirúrgicos, o para fijar o sustituir huesos rotos, ya que resiste a la acción de los fluidos corporales. En cocinas y zonas de preparación de alimentos los utensilios son a menudo de acero inoxidable, ya que no oscurece los alimentos y pueden limpiarse con facilidad [15].

VII. MECANISMOS DE CORROSIÓN DEL CONCRETO

Existen varios factores que afectan, desencadenan o producen la corrosión del acero, gracias a la despasivación del mismo. La dosificación, la compacidad y la homogeneidad del concreto, así como el espesor de recubrimiento del concreto, el estado superficial de la armadura y la humedad ambiental son los factores que afectan este proceso [2].

Como se ha dicho el concreto le proporciona una barrera de protección al acero, debido a su alto valor pH alcalino, lo cual hace que se proteja de los agentes químicos que lo dañan. Pero cuando el concreto se encuentra en contacto con el medio ambiente, este es atacado por agentes atmosféricos, entre los que encontramos los cloruros para las regiones marinas y la carbonatación en zonas industriales y rurales. Cuando estos agentes se combinan y el concreto se daña, por los agentes que lo penetran y llegan al nivel del acero, el proceso de corrosión acelera. Cuando la corrosión comienza, se manifiesta por tres vertientes:

1. La primera se manifiesta sobre el acero, provocando una disminución del diámetro inicial, trayendo consigo una disminución de en su resistencia mecánica.
2. La segunda cae sobre el concreto, debido a que cuando el acero se corroe este provoca que el concreto se agriete o haya desprendimientos.
3. La tercera y última, aunque no por ello la menos importante es sobre la adherencia entre el acero y el concreto.

Tutti realizó un modelo sencillo donde definió el tiempo que tardará la estructura de concreto reforzado en seguir prestando los servicios para los cuales se diseño. El modelo se divide en dos etapas, las cuales son [6]:

Periodo de iniciación: es el tiempo que tardarán en filtrarse en el concreto los agentes agresivos (carbonatación y iones cloruro), hasta llegar al acero y con ello romper la capa de óxido protector.

Periodo de propagación: en esta etapa se acumula el deterioro causado por la oxidación, hasta alcanzar niveles inaceptables.

Estos periodos antes descritos se ilustran en la figura VII. 1.

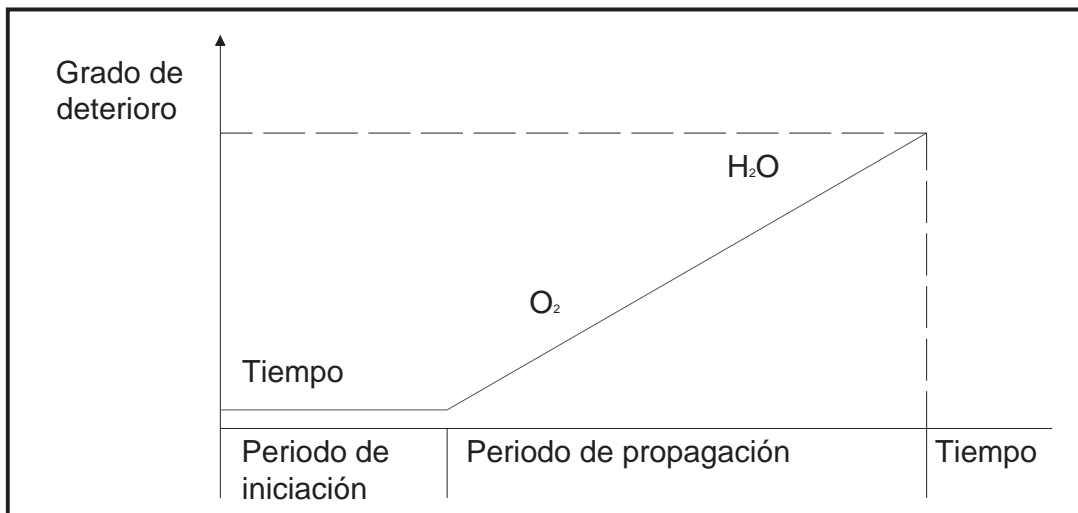


Figura VII. 1. Tiempo de vida útil en una estructura según Tutti [3].

VII. 1. DOSIFICACIÓN DEL CONCRETO

El concreto debe tener diferentes características, entre ellas está el ser sólido, homogéneo, compacto, resistente y poco poroso, para con ello garantizar, además de sus significativas prestaciones mecánicas, la protección al acero de refuerzo, de las acciones agresivas de los agentes externos.

La dosificación del concreto es un factor importante que influye de forma significativa en su comportamiento futuro, como elemento protector del acero de refuerzo.

El concreto que cubre al acero debe cumplir una doble función protectora, ya que debe ser una barrera física que se opone a la penetración de los agentes agresivos externos y a su vez crear una capa pasivante sobre el acero (en virtud de alcalinidad) que lo mantiene protegido durante un tiempo indefinido. Sabiendo estas dos funciones, el concreto se debe dosificar mediante métodos que nos garanticen que el elemento tendrá su máxima capacidad, y que la porosidad será la menor [2].

La porosidad de la masa del concreto la aporta fundamentalmente la pasta de cemento endurecida y es a través de ella que el agua ejerce su función de elemento de transferencia de los agentes agresivos externos, razón por la cual la relación a/c, el grado de hidratación y la cantidad de pasta son factores determinantes en la cantidad y tipos de poros en el concreto.

En el diseño de las mezclas de concreto hay que tener en cuenta los siguientes factores que garantizan su máxima compactación y su durabilidad:

- a) La forma de proporcionar los agregados de la mezcla, que garantice el menor volumen de vacío que será ocupado por la pasta de cemento endurecida.
- b) La influencia que ejerce la cantidad de agua de la mezcla en la consistencia del concreto en estado fresco.
- c) La influencia de la relación a/c, la cual podrá ser mejorada substancialmente con el uso de aditivos químicos.

- d) La influencia del grado de hidratación del cemento en la cantidad de poros del concreto endurecido.
- e) La influencia de las propiedades físicas de los agregados que se empleen en la calidad final del concreto.
- f) La acción positiva de ciertas adiciones activas al cemento como, fluidificantes, retardantes, acelerantes, etc. [2].

VII. 2. COMPACIDAD Y HOMOGENEIDAD

La compacidad del concreto es la propiedad más importante del mismo a los efectos de su resistencia a la penetración de los agentes agresivos externos. Ella es inversamente proporcional a la porosidad y mientras más alta sea la primera, expresa en que magnitud está protegido el acero de la armadura, minimizando significativamente la carbonatación y el ataque de los cloruros, que son los agentes agresivos más importantes.

La compacidad del concreto está expresada por la cantidad de materia sólida contenida en unidad cúbica, o es la relación entre volumen sólido y el volumen aparente total. Esta se mide como la relación entre la suma de los volúmenes absolutos de materias sólidas (grava, arena y pasta de cemento endurecida) contenida en un metro cúbico de concreto, referido al volumen aparente del mismo [2].

La compacidad está dada principalmente, por la cantidad y calidad de los materiales y de la adecuada proporción entre ellos. Sin embargo, aun cumpliéndose con esta condición, la compactación puede ser afectada por un mal mezclado y un mal transporte, ya que esto afecta la homogeneidad del concreto,

propiciando la segregación de los materiales. De igual manera, la segregación puede producirse por un procedimiento deficiente en la colocación del concreto y/o inadecuado proceso de compactación.

Las mezclas con relación a/c bajas (<0.4) son usadas en ambientes agresivos por la alta protección brindada a la armadura (baja porosidad y alta alcalinidad). Sin embargo, un curado deficiente de estas mezclas impide la hidratación del cemento, principalmente en la superficie del concreto, lo cual se manifestará en un incremento de la porosidad y por lo tanto en la disminución de su resistencia a la agresividad ambiental.

Por otra parte, la homogeneidad del concreto es la cualidad por la cual los distintos componentes del mismo aparecen igualmente distribuidos en toda su masa, de tal manera que dos muestras tomadas de distintos lugares de la estructura fabricada con el mismo concreto, resulten prácticamente iguales. El concreto, por su origen, es un material heterogéneo pero se puede lograr su homogeneidad mediante un adecuado proceso tecnológico de producción, transporte, colocación, compactación y curado.

De tal manera que un concreto que tenga una adecuada compacidad y homogeneidad garantizaría la protección de la armadura, en el ambiente específico para el cual fue diseñada la mezcla. En la práctica, para obtener esto se debe cumplir con una serie de actividades secuenciales, las cuales se encuentran íntimamente ligadas entre sí. Estas actividades son: buena selección y proporcionamiento de los materiales, buena operación de mezclado y buena calidad en la ejecución de los procedimientos de transporte, colocación, compactación, curado y donde sea aplicable, una cuidadosa operación de desmolde [2].

VII. 3. ESPESOR DE RECUBRIMIENTO DEL CONCRETO

La protección que confiere el concreto que recubre las barras de acero de una estructura de concreto armado o pretensado dependerá del grado de impermeabilidad de éste, que a su vez estará dada por su compacidad y homogeneidad en esa zona.

En muchos casos, esta masa de concreto no cumple con sus funciones específicas por que suele ser menos compacta y más porosa que el resto del volumen que constituye el elemento. Este fenómeno puede producirse por varias causas, siendo la más importante una mala compactación del concreto.

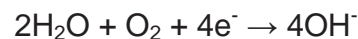
El espesor de esta capa de concreto es importante para garantizar la protección de la armadura, dependiendo del ambiente al cual va a estar expuesto. Existen normas internacionales en las que se especifican los espesores adecuados de acuerdo con la agresividad ambiental, entre ellas tenemos la EH – 88, Código Modelo, BAEL – 83 y DIN 1045 – 1978, las cuales sugieren un espesor mínimo de 40 mm; el Euro código No. 2 y pr EN 206, las cuales nos sugieren un espesor de 58 mm; la BS 8110 – 1985, la ACI – 318 y JASS – 5 – 1986, las cuales nos sugieren un espesor mínimo de 60 mm.

Sin embargo, estructuralmente es recomendable que este espesor sea el mínimo indispensable, ya que por ser una zona desprovista de armadura, pudiera verse afectada por fisuración, particularmente si el elemento está sometido a esfuerzos de tracción. Por tal motivo, las normas recomiendan que en ambientes agresivos debe utilizarse una mezcla de calidad con alto contenido de cemento y baja relación de a/c, garantizando así que espesores de 2 a 3 pulgadas (5.0 – 7.5 cm) permitan una alta durabilidad de la estructura [2].

Es necesario considerar el papel de las grietas en el concreto, ya que éstas pueden reducir la efectividad protectora del recubrimiento y de este modo reducir la vida útil de la estructural, al permitir una penetración más rápida de los iones cloruro, el dióxido de carbono, el agua y el oxígeno u el ataque del acero de refuerzo. El efecto de las grietas está en función de su origen, anchura, intensidad y orientación [2].

VII. 4. HUMEDAD AMBIENTAL

La presencia de agua es imprescindible para la corrosión en medios neutros y alcalinos, pues interviene en el proceso catódico de reducción del oxígeno:



Además, el agua es necesaria para la movilidad de los iones a través del electrólito. En el concreto seco, la resistividad eléctrica es tan elevada que impide que la corrosión se produzca aun en ausencia de la capa pasivante sobre el acero; sólo la existencia de una cierta cantidad mínima de humedad en los poros del concreto permitirá el desarrollo de los procesos corrosivos. Por tanto, cuanto mayor sea el contenido de humedad contenida en los poros del concreto, menor será el valor de la resistividad eléctrica y más elevadas podrán ser, en principio, las velocidades de corrosión [2].

El contenido en agua de los poros es función, en situaciones de no inmersión o no saturación, de la humedad relativa (HR) del ambiente. La humedad relevante, es decir, la que influye en los procesos de corrosión, es la realmente contenida en los poros. A este respecto, debe tenerse presente que la humedad ambiental y la del concreto sólo coinciden en regímenes estacionarios y que en condiciones cambiantes es mayor la humedad del concreto, porque éste pierde agua a menor

velocidad de lo que la gana a causa de la existencia de tensiones capilares. Este último fenómeno puede verse acrecentado cuando el concreto esté contaminado por cloruros, a causa del carácter higroscópico de los mismos. Asimismo, aunque el ambiente exterior esté seco, el interior del concreto no se seca más que cuando tales circunstancias se prolongan largo tiempo. En la mayoría de los concretos, a partir de 3 – 4 cm del medio exterior, los poros siempre se encuentran saturados o casi saturados de humedad. Este comportamiento está muy influenciado por la porosidad del concreto, ya que los concretos muy porosos permitirán una respiración más profunda que hormigones más densos, cuya “piel” sólo “respira” en los 1 – 2 cm más externos [2].

VII. 5. EFECTO DEL OXÍGENO

No es posible que el proceso de corrosión se desarrolle sin que llegue una mínima cantidad de oxígeno hasta las armaduras, es decir, es necesaria una cierta “aireación” de las mismas.

Durante mucho tiempo se ha considerado que el acceso o flujo de oxígeno es el factor determinante de la velocidad de corrosión. Así, se piensa a menudo que el espesor del recubrimiento influye mucho en el acceso de oxígeno y se han realizado múltiples trabajos para medir la permeabilidad del concreto al oxígeno, al aire o a los gases [2].

Si el flujo de oxígeno fuera el factor determinante de la velocidad de corrosión, sin duda ésta debería ser mayor en un concreto seco, conservando por ejemplo en una atmósfera con un 50% de HR, que en un concreto húmedo donde el flujo de oxígeno es menor, ya que éste tiene que disolverse previamente en el agua contenida en los mismos. Sin embargo, la evidencia experimental muestra claramente que la velocidad de corrosión es máxima cuando los poros tienen

suficiente agua, sin llegar a saturarse, como para facilitar los procesos de corrosión.

Cuando el concreto tiene los poros completamente saturados de agua, el oxígeno se tiene que disolver en ella antes de alcanzar las cercanías de la armadura. En este caso el flujo de oxígeno es el factor controlante, ya que la cantidad que fluye es muy limitada. En todos los demás casos, el acceso de oxígeno siempre es suficiente para soportar la velocidad de corrosión que permita la resistividad del concreto.

Cuando el concreto es denso y el ambiente exterior contiene unos niveles medios de humedad, los poros están completamente saturados de agua a partir de los 3 – 4 cm del exterior. Por lo tanto, si existen armaduras más interiores y éstas están despasivadas, su velocidad de corrosión estará limitada, pero si están más cerca de la superficie, su velocidad de corrosión puede ser muy elevada.

Existen varios ensayos en los que se intenta correlacionar la mayor o menor permeabilidad del concreto frente a los gases con su menor o mayor capacidad protectora en procesos de corrosión. Sin embargo, se ha demostrado que debido a que la corrosión es un proceso electroquímico, sólo son válidos los valores de flujo de oxígeno cuando se miden utilizando “fuerzas impulsoras” de tipo electroquímico y no aquellas provenientes de fuerzas mecánicas.

En la práctica, una aproximación gruesa, pero suficiente y no sofisticada, para conocer la mayor o menor bondad de un concreto en relación a su permeabilidad al oxígeno es medir su porosidad o índice de “huecos” accesibles [2].

VII. 6. EFECTO DE LA TEMPERATURA

La temperatura juega también un doble papel en los procesos de deterioro. Por un lado, su incremento proporciona la movilidad de las moléculas facilitando el transporte de sustancias; por otro, su disminución puede dar lugar a condensaciones que, a su vez, pueden producir incrementos locales importantes del contenido de humedad del material. Además, la cantidad absoluta de vapor de agua en la atmósfera varía con la temperatura. Existe un efecto opuesto entre humedad y temperatura, ya que al aumentar esta última se evapora y cuando desciende, condensa agua líquida en los capilares.

Finalmente, es importante destacar que estos tres factores ambientales (humedad, oxígeno y temperatura) tienen efectos contrapuestos y que, por tanto, no es fácil predecir la evolución del proceso de corrosión del acero a partir de uno sólo. Esta característica del “efecto inversor” (por ejemplo, una mayor humedad facilita la corrosión pero impide el acceso de oxígeno, o bien una mayor temperatura acelera la corrosión pero disminuye la condensación) lleva múltiples predicciones erróneas de comportamiento de las armaduras [2].

VII. 7. ESTADO SUPERFICIAL DEL ACERO

Siendo la superficie del acero la primera interfase con el medio, es lógico pensar que su estado superficial afectará las reacciones que tendrán lugar en contacto con él. En términos generales, el acero cuya superficie posee la cubierta de óxidos provenientes del proceso de conformado se presenta menos reactivo que aquél cuya superficie está libre de dicha capa.

No obstante, la presencia de productos de oxidación generados por la corrosión atmosférica no necesariamente demuestra igual comportamiento, siendo incluso

altamente probable que de estar contaminados con agentes agresivos como el ion cloruro, se propicie la corrosión.

Adicionalmente, los productos de corrosión presentes en forma masiva, no adherentes o condiciones propicias para la corrosión de la armadura en el concreto. Esto es particularmente crítico cuando se utiliza acero de alto límite elástico en concreto pre y postensado. En estos casos la superficie del acero debe encontrarse limpia y cabe resaltar que no se aceptará reducción de sección, ya que cualquier resto de óxido puede inducir grietas de corrosión bajo tensión a largo plazo [2].

VII. 8. TENSIONES MECÁNICAS DEL ACERO

Los aceros pre- y pos tensado son de composición eutectoide (alrededor del 0.8% de C) y suelen estar sometidos a tensiones entre el 60 y el 80% de su límite elástico. Estas elevadas tensiones no representan ningún riesgo si el acero está exento de imperfecciones y de óxidos superficiales y si el concreto que lo rodea es de elevada calidad.

En el concreto donde la carbonatación alcance los alambres tensados, o donde haya ciertos iones despasivantes (SCN^- , $\text{S}^{=}$, Cl^-), existe el riesgo de una corrosión bajo tensión. Este tipo de corrosión se caracteriza por incubar grietas no visibles al ojo humano, que se propagan con relativa rapidez hacia el interior. Alcanzada una pérdida de sección crítica el alambre se rompe de forma frágil.

No todos los concretos pre o pos tensados que se deterioran lo hacen mediante este mecanismo que es relativamente inusual; la mayoría de las fallas se deben a una corrosión simple por cloruros o por carbonatación.

La única forma de confirmar el tipo de rotura es mediante el estudio microscópico de las superficies fracturadas [2].

VII. 9. IONES DESPASIVANTES

De los iones despasivantes, son los cloruros los que más afectan directamente la pasivación del refuerzo. Los iones sulfato intervienen en la degradación del concreto, lo cual puede permitir que la armadura se exponga al medio, produciéndose así su corrosión.

VII. 9. 1. Cloruros

Otro ambiente que permite la corrosión del acero es el marino, atacando al concreto gracias a los iones cloruro que se encuentran en el mar, pero no solo sucede cuando la estructura se encuentra sumergida en el agua, sino también en la que se encuentra fuera de ella, ya que el viento arrastra la brisa y la deposita en las estructuras de concreto.

De igual forma que la carbonatación, los iones cloruro penetran al concreto, hasta llegar al nivel del acero haciendo que se rompa la capa protectora y con ello inicie la corrosión. Los cloruros provocan una disolución localizada de la capa pasiva, lo que da lugar a ataques puntuales (picaduras) que pueden reducir drásticamente la sección del acero, en un tiempo relativamente corto.

Podemos encontrar estos iones en el concreto de tres formas: enlazados, adsorbidos y disueltos en el agua que se conserva en los poros. Los iones cloruro que más perjudican al acero son aquellos que se encuentran disueltos. Cuando los iones cloruro entran por una fuente externa a través de los poros del concreto y

estos avanzan al interior, una cantidad reacciona, otra se absorbe y otra queda disuelta.

Es necesario diferenciar los cloruros que penetran al concreto en un ambiente marino de los de las sales del deshielo, ya que en el marino la proporción de cloruros es constante, a diferencia del otro ambiente, ya que su proporción exterior será proporcional a la cantidad de sales que se emplean al año debido a la frecuencia y duración de las heladas.

Se tienen que tomar tres aspectos para el caso de los cloruros que penetran al concreto:

- El tiempo que tardan en llegar hasta la armadura.
- La proporción que induce la despasivación.
- La velocidad de corrosión que provocan una vez desencadenada la corrosión.

Es necesario averiguar a qué profundidad se encuentra la penetración de los cloruros para saber el tiempo que tarda en llegar al acero, ya que el recubrimiento del concreto debe ser superior a la profundidad a la que lleguen los iones durante la vida útil de la estructura [2].

VII. 9. 2. Sulfatos

El ion sulfato (SO_4^{-2}) puede estar presente en las aguas residuales industriales en forma de solución diluida de ácido sulfúrico; en las aguas del subsuelo, pocas veces aparece el sulfato en forma iónica, siendo mucho más frecuentes sus sales, es decir, los sulfatos. El contenido de sulfatos, por tanto, será expresado como concentración del anión SO_4^{-2} en mg/L. Antes se acostumbraba enjuiciar el riesgo

de degradación basándose en el contenido de SO_3^{-2} de los terrenos o de las aguas.

El ion sulfato forma sales. Los sulfatos perjudiciales para el concreto se encuentran preferentemente en los terrenos arcillosos o en capas freáticas. De estas sales las más importantes son las siguientes: los sulfatos más peligrosos para el cemento Portland son los amónicos, cálcico, magnésicos y sódicos; los sulfatos potásico, cúprico y alumínico son menos peligrosos, mientras que los sulfatos báricos y el de plomo son insolubles y, por lo tanto, inofensivos para el concreto.

La presencia de sulfatos en un agua que está en contacto con una pasta endurecida de cemento, puede incrementar considerablemente la solubilidad de los componentes de dicha pasta y causar, por una parte el desarrollo de la degradación del concreto por lixiviación. De otro lado, la presencia de sulfatos puede ocasionar una reacción de cambio de base, en el curso de la cual el catión del sulfato será sustituido por Ca^{+2} , originándose la degradación del concreto por reacción de cambio iónico. En ciertas circunstancias puede ocurrir, sin embargo, que la presencia de los sulfatos dé lugar a una degradación por expansión debido a la formación de otros componentes estables en la masa endurecida del cemento.

Una de las causas de la nocividad de los sulfatos es el yeso que se forma al reaccionar el anión sulfato del agua con el Ca(OH)_2 liberado por el cemento, el cual se deposita en el poros del concreto en donde se cristaliza con absorción de dos moléculas de agua. Este proceso de reacción química y cristalización, que es acompañado de un incremento de volumen, ejerce una acción expansiva en los poros del concreto (especialmente en los de las capas superficiales) y termina por lograr su desmoronamiento. Se ha indicado que este aumento de volumen es del

17.7%. Si existen además iones Mg^{++} , la formación de hidróxido magnésico produce un aumento de volumen del 19.6% aproximadamente.

La degradación producida por los sulfatos es causada en su mayor parte por el contenido de aluminato tricálcico del cemento. El C_3A reacciona con el yeso formado por el ion sulfato y el $Ca(OH)_2$, o con el yeso contenido en el agua selenitosa original, formándose un sulfo-aluminato cálcico hidratado de gran complejidad y poco soluble. Este compuesto cristaliza absorbiendo 31 moléculas de agua y creando fuertes presiones internas, a causa de su fuerte aumento de volumen. Dicha sal compleja es llamada de Michaelis-Candlot-Deval, existente en la Naturaleza y llamada etringita. Se debe indicar que la etringita sólo se forma para determinados valores del pH.

Los cristales aciculares (bacilos del cemento) formados con absorción de agua de cristalización aumentan de volumen, de tal forma que el concreto se desmorona debido a la fuerte expansión desarrollada [2].

VII. 10. CARBONATACIÓN

La carbonatación no es sino el proceso en el que reacciona el dióxido de carbono de la atmósfera (CO_2) con los componentes alcalinos de la fase acuosa del hormigón es decir entre el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) y otros álcalis (sodio y potasio). Como resultado de esta reacción se forma carbonato de calcio ($CaCO_3$) y se acidifica el hormigón.

El proceso de carbonatación ocurre con mayor rapidez en hormigones de baja calidad y en ambientes cuya humedad relativa varía entre 50 y 70% [2].

El pH del concreto es también afectado principalmente por el CO₂, pero también por el trióxido de azufre (SO₃), este último se produce gracias a la combustión de combustibles, aunque el primero es el de mayor afectación.

El CO₂ ataca a la mezcla externa del concreto haciendo que se carbonate, y sigue penetrando hasta que el pH sea igual a 9, cuando todo el concreto que se encuentra alrededor del acero tenga este valor, la corrosión comienza a desarrollarse. A esta profundidad de CO₂ se le denomina “frente de carbonatación”.

Esta profundidad se puede medir, y con ello saber superficialmente como se encuentra el acero de refuerzo. La velocidad con que penetra el CO₂ en un ambiente acuático es 10⁴ veces más lenta que la velocidad de penetración en el aire.

Cuando los poros del concreto se encuentran completamente secos, el CO₂ no podrá reaccionar con él y, cuando estos están completamente saturados, la penetración será muy lenta, ya que este se disuelve lentamente en un medio acuoso. Pero cuando los poros se encuentran parcialmente llenos (entre 50 y 80%), este proceso se acelera más rápido, ver esto en la figura VII. 2 [5].

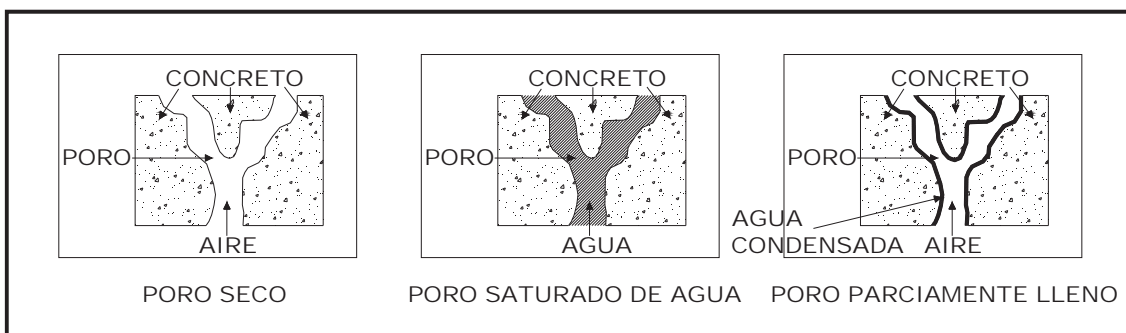


Figura VII. 2. Representación esquemática de cómo se pueden encontrar los poros de concreto expuesto a la atmósfera [6].

Los parámetros que nos permiten medir la velocidad de carbonatación, son:

- Composición y cantidad del cemento.
- La compactación.
- Condiciones de curado del concreto.
- Condiciones ambientales de exposición del concreto.

La carbonatación se presenta más comúnmente en zonas rurales y zonas urbanas, en estas zonas se alcanzan grandes niveles de óxidos sulfurosos (SOx) y nitrosos (NOx), que al combinarse con el agua se forman sus respectivos ácidos. Estudios realizados han comprobado que en zonas con altos índices de contaminación y altas precipitaciones, los valores del pH llegan a ser de 4, esto provoca que se generen lluvias ácidas, las cuales son muy perjudiciales para el concreto, ya que lo afecta tanto como la carbonatación.

La velocidad de carbonatación puede modelarse mediante la ley de la raíz cuadrada del tiempo, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$X_{CO_2} = K_{CO_2} \sqrt{t} \dots\dots\dots [2]$$

Donde:

X_{CO_2} = Distancia de carbonatación desde la superficie del concreto hasta donde termina este, se mide en mm.

K_{CO_2} = Constante de carbonatación en mm/año^{0.5}

t = Tiempo que se encuentra la estructura de concreto en el medio ambiente, en años.

VII. 11. CAUSAS DE LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS

Existen agentes agresivos que contribuyen con la aceleración de la corrosión, se puede decir que esencialmente se encuentran dos causas que pueden lograr la destrucción de la capa protectora pasiva del acero, las cuales son:

1. Una cantidad suficiente de cloruros, u otros iones despasivantes en contacto con la armadura.
2. La disminución de la alcalinidad de hormigón por reacción con sustancias ácidas del medio.

La primera causa da lugar a que se pueda desarrollar una corrosión del tipo localizado, es decir picaduras en ciertos puntos, mientras que la segunda donde el potencial pH del concreto disminuye, y por tanto el fenómeno es de tipo generalizado. Otra causa dentro de la corrosión localizada, se encuentra la que se manifiesta por la tensión que sufre el acero y por tal motivo empieza a sufrir fisuras en su superficie, esta característica se manifiesta sólo en concretos pretensados o pos tensados [16].

VIII. TÉCNICAS PARA ESTIMAR EL ESTADO DE CORROSIÓN EN EL CONCRETO

VIII. 1. PRUEBA DE MEDICIÓN DE POTENCIALES ELECTROQUÍMICOS (NORMA ASTM – C – 876 – 91)

Las pruebas electroquímicas son utilizadas para la determinación del estudio de la corrosión en el acero de refuerzo el cual se encuentra embebido en el concreto. Las técnicas más utilizadas son: la medición de potencial de corrosión (E_{corr}), resistencia de polarización (R_p), voltametría cíclica y espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).

Esta prueba consiste en la aplicación de señales de potencial y el registro de su respuesta en corriente, o bien la aplicación de señales de corriente y el registro de la respuesta del potencial. De las dos maneras, se polariza la interfase, y su respuesta es característica de cada sistema bajo estudio [5].

Los resultados informan sobre la posibilidad que tiene un elemento estructural de sufrir corrosión, pero es importante que se tomen en cuenta la humedad, la contaminación, la calidad del concreto, entre otros aspectos. A continuación se da una guía de referencia de las condiciones y riesgo asociados a valores de potencial (tabla VIII. 1) [2].

Tabla VIII. 1. Criterio de valoración de potenciales del acero en concreto vs. Cu/CuSO₄ [1].

CONDICIÓN	POTENCIAL (ESC)	OBSERVACIONES	RIESGO DE DAÑO
Estado pasivo	0,200 a -0,200	Ausencia de Cl ⁻ , pH>12.5, H ₂ O(HR↑)	Despreciable
Corrosión Localizada	-0,200 a -0,600	Cl ⁻ , O ₂ , H ₂ O (HR↑)	Alto
Corrosión uniforme	-0,150a-0,600 +0,200 a 0,150 +0,400 a 0,600	Carbonatado O ₂ , H ₂ O, (HR↑) Carbonatado O ₂ , seco, (HR↑) Cl ⁻ Elevado, H ₂ O ó carbonatado	Moderado Alto Bajo Alto
Corrosión uniforme	< -0,600	↑Cl ⁻ , ↑ H ₂ O (sin O ₂)	Despreciable

El potencial electroquímico es el potencial eléctrico de un metal, el cual es relativo a un electrodo de referencia, y es medido en condiciones de circuito abierto.

La norma ASTM – C – 876 – 91, establece los criterios para relacionar al potencial de corrosión y su condición de corrosión, los cuales se muestran en la tabla VIII. 2.

Tabla VIII. 2. Norma ASTM – C – 876 – 91. Criterio de probabilidad de corrosión [6].

ECOR vs ECS (mV)	PROBABILIDAD DE CORROSIÓN
> -120	10% que se presente
-120 a -270	Zona incierta
< -270 Mv	90% que se presente

La técnica de resistencia de polarización es la más usada, por ser la más fácil y simple. La prueba se realiza conectando la terminal de un voltímetro, de alta impedancia interna, al acero que se encuentra dentro del concreto y la otra terminal, a un electrodo de referencia. Con ello podemos medir un potencial de media celda, lo cual se ilustra en la figura VII. 1., aunque no se puede predecir a qué velocidad ocurrirá la corrosión, la cual es una desventaja para esta técnica [6].

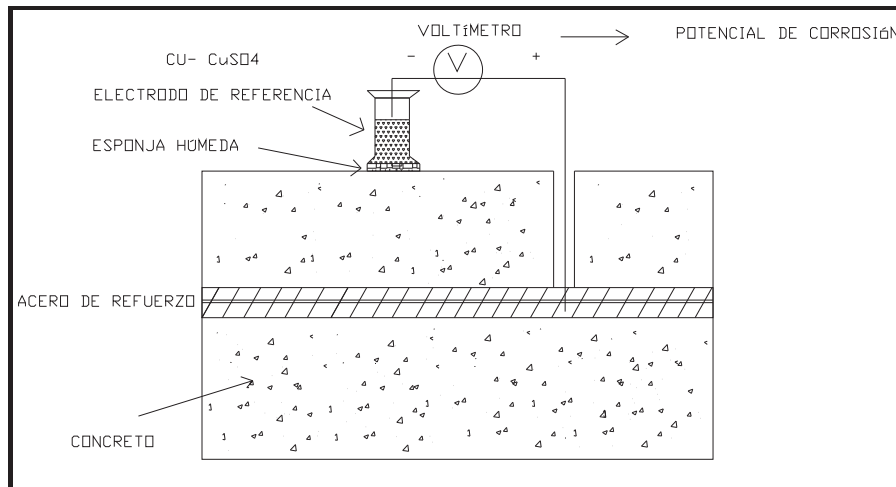


Figura VIII. 1. Medición de Potenciales de la armadura [6].

Stratful^[5] realizó diversas pruebas en puentes de los Estados Unidos y determinó algunas correlaciones, las cuales se muestran en la tabla VII. 3.

Tabla VIII. 3. Criterio de Stratful para potenciales de corrosión como porcentaje de probabilidad de corrosión [6].

ECOR (mV) vs ESC	PROBABILIDAD DE CORROSIÓN
-240	0%
-275	5%
-350	50%
-450	95%
-500	100%

El potencial de corrosión (E_{corr}) es el estado estacionario en el cual se igualan las velocidades de reacción de oxidación (anódica) y de reducción (catódica).

Este potencial no es suficiente para determinar si la velocidad de corrosión aumenta o disminuye, ya que el E_{corr} es un parámetro termodinámico que resulta útil para predecir la estabilidad de especies, pero tiene la gran limitación en cuanto a la cinética de los procesos de corrosión [6].

VIII. 2. VELOCIDAD DE CORROSIÓN

Con esta prueba podemos determinar a qué velocidad se puede corroer el acero de refuerzo el cual se encuentra embebido en el concreto, ya que así se podría saber cuánta pérdida del metal por unidad de superficie y tiempo en g/cm^2 día, pero la forma electroquímica de reportarse es en unidades de penetración de la siguiente forma V_{corr} (mm/año o mils/year).

En este caso de estudio específico, es un proyecto ya establecido en probetas de 15 x 15 x 30 cm y armadas con 6 varillas de 12 mm de diámetro, y se encuentran a 1.5, 2.0 y 3.0 cm de espesor de recubrimiento como se muestra en la figura VIII. 2 y VIII. 3., en la tabla VIII. 4., podemos observar la cantidad de materiales que fueron usados para la elaboración de las probetas.

Tabla VIII. 4. Cantidades de los materiales usados en las probetas [17].

CONTENIDO (kg/m ³)	a/c = 0.45	a/c = 0.65
Cemento	411 kg	285 kg
Agua	185 kg	185 kg
Agregados gruesos	1010 kg	1033 kg
Agregados finos	731 kg	812 kg
Aditivo	4 cc/kg cemento	4 cc/kgcemento

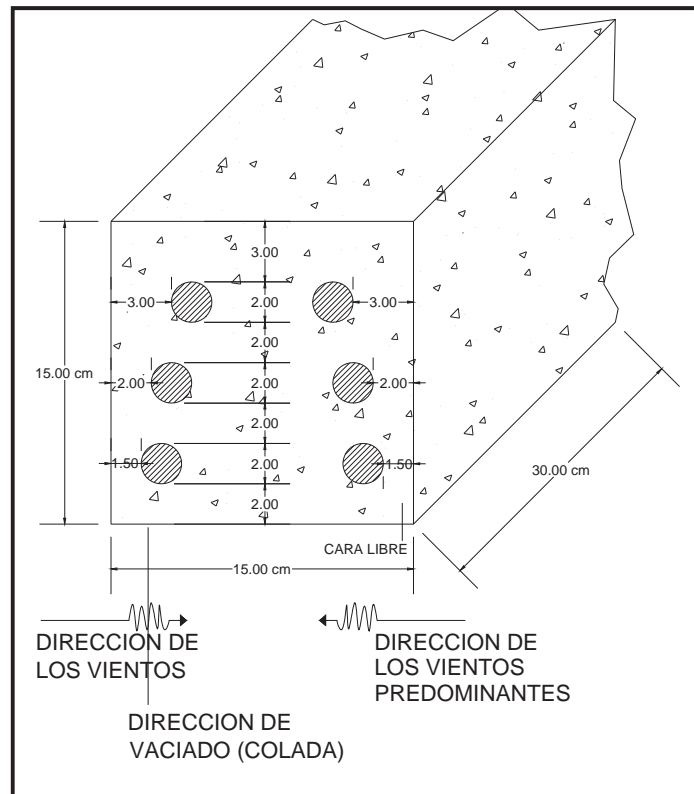


Figura VIII. 2. Dimensiones de la probeta armada.

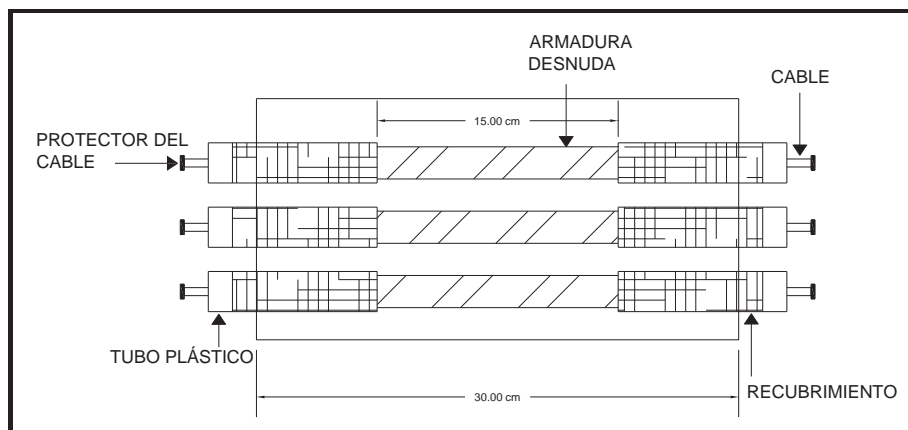


Figura VIII. 3. Probeta electroquímica.

Las lecturas se obtienen a través del aparato Gcorr 6 y 8, y la velocidad de corrosión se determina utilizando la fórmula siguiente:

$$I_{corr} = 0.026 / R_p$$

Donde:

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

0.026 = 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 multiplicar un factor igual a 11.6 por el I_{corr} .

Como se ve la probeta tiene en los extremos cables, los cuales ayudan a conectar al Gcorr 6 y 8 y con ello determinar el I_{corr} , el cable que ayuda a conectar la probeta y el aparato tiene en su extremo una especie de "caimán" el cual se conecta con estos cables y así determinar este índice para cada uno de los espesores.

VIII. 3. DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE LA CARBONATACIÓN

Antes se mencionó que la carbonatación es necesaria, para que junto con el potencial de corrosión den un diagnóstico más confiable de cómo se encuentra el estado de el acero y de el concreto.

Esta prueba ayuda a determinar el avance de la carbonatación en el concreto por el método de la vía húmeda con solución de indicador ácido-base.

Se puede definir a la carbonatación como la reducción de alcalinidad normal (pH entre 12 y 14) del concreto por efecto del CO_2 que difunde desde el ambiente que lo rodea. En presencia de humedad, el CO_2 reacciona con los álcalis (usualmente hidróxidos de calcio, sodio y potasio), neutralizándolos para formar carbonatos disminuyendo el pH por debajo de 10.

VIII. 3. 1. EQUIPOS Y MATERIALES PARA DETERMINAR EL GRADO DE CARBONATACIÓN

- Instrumentos de medición: escala milimétrica, vernier, etc.
- Herramientas para extracción de muestras: piquetas, taladros, etc.
- Material para limpieza superficial: brocha, trapos, etc.
- Solución indicadora ácido-base: fenolftaleína (1g fenolftaleína + 49g alcohol + 50g agua) [4].

VIII. 3. 2. PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE CARBONATACIÓN

El diagrama de flujo que se muestra a continuación en la figura VIII. 4., la cual muestra el procedimiento que se debe seguir para la prueba.

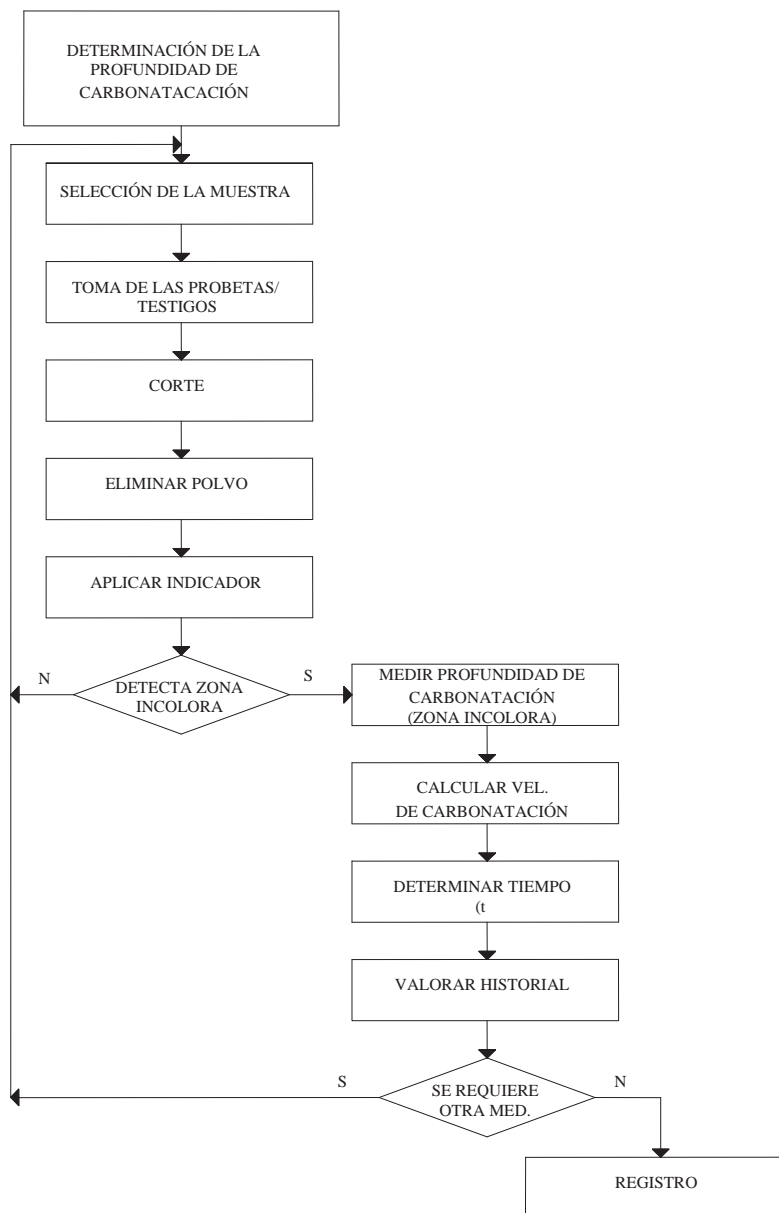


Figura VIII. 4. Diagrama de flujo de la realización de la prueba de carbonatación [2].

- a. Toma de probetas/testigo. La sección será un corte transversal donde un extremo corresponderá a la superficie expuesta a la atmósfera. La probeta/testigo puede ser cilíndrica o una porción extraída. El tiempo de exposición de la superficie a evaluar no podrá ser mayor de 15 minutos (fractura fresca).

En caso de que no pueda extraerse un testigo o porción, se procederá a taladrar una o varias secciones manual o mecánicamente hasta la profundidad de interés, dejando el lugar libre de material suelto y polvo, lo cual expondrá la superficie para el análisis.

- b. Determinación de la profundidad de carbonatación. Una vez seleccionada la probeta y estando su superficie libre de polvo, se aplicará por atomización el indicador ácido-base en forma uniforme.

Luego de la aplicación, antes de transcurridos 15 minutos, se efectuará la medición de la longitud (profundidad) de la zona incolora desde la superficie, determinándose con precisión los valores máximos/mínimos del frente incoloro y la media aritmética, de un mínimo de medición, en función del tamaño de la probeta. El procedimiento no debe tardar más de 20 minutos.

Deberá levantarse un registro preciso sobre la ubicación de las probetas/testigos, tonalidad visualizada, profundidad de carbonatación medida e indicar explícitamente el tipo de indicador utilizado. Igualmente se efectuará un registro fotográfico donde sea pertinente.

VIII. 3. 3. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

- a. Nivel de pH. En función del indicador ácido-base seleccionado se establecerá el pH del frente incoloro en la muestra.

La fenolftaleína es el indicador más comúnmente utilizado y su rango de viraje está entre pH 8.2 y pH 9.8. Varía su tonalidad de incoloro a violeta rojizo, como se muestra en la figura VIII. 5.



Figura VIII. 5. Prueba de profundidad de carbonatación en especímenes de concreto [propia].

La timolftaleína es otro indicador que podría utilizarse, ya que su rango de viraje está entre pH 9.3 y pH 10.5 con tonalidades de incolora a azul.

- b. Cálculo de la velocidad de carbonatación. Uno de los modelos más sencillos que permite predecir la velocidad de carbonatación del concreto armado es el que relaciona la profundidad de carbonatación con la raíz cuadrada del tiempo de exposición, antes mencionada en el capítulo VII.10.

Con los resultados de una determinación de profundidad de carbonatación es posible predecir la progresión de la misma y el tiempo en el cual la carbonatación alcanzará el refuerzo del hormigón si se conoce la profundidad de éste.

$$K_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}}{\sqrt{t_0}} \dots\dots\dots[2]$$

Se calcula la constante K_{CO_2} de la primera determinación y el tiempo en que ocurrió la carbonatación. Se utiliza esta constante junto con la profundidad de la armadura e_c y se determina en cuánto tiempo la carbonatación alcanzará la armadura.

Este modelo no debe ser aplicado a estructuras con menos de tres años de vida, en cuyo caso se recomienda dos o más medidas con un intervalo mínimo de 6 meses. Siempre es recomendable hacer más de una evaluación para aumentar la certeza de la información obtenida para poder predecir el comportamiento de la carbonatación, con un desfase de al menos 6 meses.

Adicionalmente, se ha indicado que valores de K_{CO_2} de 2 a 3 mm/año^{0.5} (en función del recubrimiento) pueden ser considerados como indicativos de elevada resistencia a la carbonatación, mientras que valores $K_{CO_2} > 6$ mm/año^{0.5} indican hormigones de muy baja resistencia [2].

VIII. 4. CONCENTRACIÓN DE CLORUROS

Se define al Ion cloruro como los solubles que se encuentran en el agua o en la atmósfera, y que representan un riesgo significativo para el acero de refuerzo que se encuentra embebido en el concreto, ya que una vez que llegan a alcanzarlo empieza a causar la corrosión en el elemento.

Esta prueba nos ayuda a determinar cuanta es la concentración de cloruros que han penetrado al concreto, ya que gracias a que se conoce la profundidad se

puede estimar la velocidad de penetración que tiene, a su vez con ello podemos conocer el estado en el que se encuentra la estructura y el tiempo que tardará en alcanzar al acero de refuerzo.

Esta prueba se realiza una vez que se han extraído las muestras del elemento a estudiar, ya sean cilindros (con una relación 3:1) o polvo (mediante un taladro).

El testigo (cilindro) se corta con un disco de corte en rodajas de 5 a 10 mm, tal como se indica en la figura VIII. 6. Las rodajas se deben triturar antes de someterlas al análisis correspondiente.

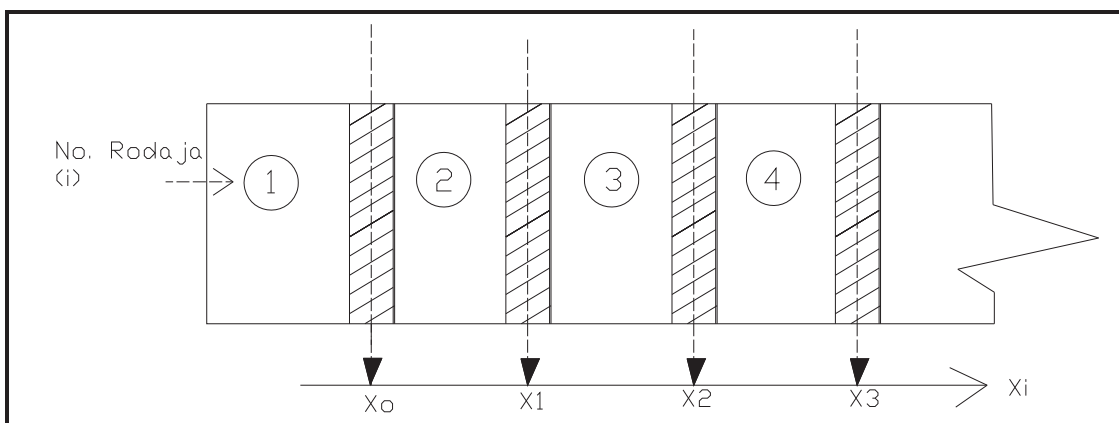


Figura VIII. 6. Cortes sobre núcleo testigo

Cuando se extrae una muestra de polvo se agujera el elemento a estudiar utilizando un martillo adecuado, al cual se le acopla una broca o cincel de metal duro. Esto ayuda a que se retire el material a diferentes profundidades.

Después de tener el polvo se pesa una cantidad de 3.00 gr, los cuales serán disueltos en 20 ml de líquido de extracción, el contiene una cantidad precisa medida de ácido. Los iones cloruro reaccionan con el ácido en una reacción electroquímica.

Las normas recomiendan adoptar como valor límite permisible el de 0.40% de cloruros totales en relación a la masa de cemento para las estructuras de concreto reforzado. Para concreto pretensado y potenzado el límite debe ser de 0.20% [2].

IX. PRUEBAS Y RESULTADOS

IX. 1. PRUEBAS DE CARBONATACIÓN

Primer Año (26 de Diciembre de 2004)

MEZCLA	PROBETA	ESTACIÓN MORELIA, MICHOACÁN					
		CARA EXPUESTA			CARA RESGUARDADA		
		ρ (K Ω)	X_{co_2} (mm)	K (mm/a ^{1/2})	ρ (K Ω)	X_{co_2} (mm)	K (mm/a ^{1/2})
a/c = 0.45	P 34-45-05-02	-----	1	1	-----	1	1
	P 35-45-05-02	-----	2	2	-----	2	2
	P 36-45-05-02	-----	0	0	-----	2	2
a/c = 0.65	P 34-65-05-02	-----	5	5	-----	5	5
	P 35-65-05-02	-----	6	6	-----	7	7
	P 36-65-05-02	-----	5	6	-----	4	4

Segundo Año (08 de diciembre de 2005)

MEZCLA	PROBETA	ESTACIÓN MORELIA, MICHOACÁN					
		CARA EXPUESTA			CARA RESGUARDADA		
		ρ (K Ω)	X_{co_2} (mm)	K (mm/a ^{1/2})	ρ (K Ω)	X_{co_2} (mm)	K (mm/a ^{1/2})
a/c = 0.45	P 34-45-05-02	-----	3.32	2.35	-----	6.2	4.38
	P 35-45-05-02	-----	5.28	3.73	-----	4.68	3.31
	P 36-45-05-02	-----	6.02	4.26	-----	4.36	3.08
a/c = 0.65	P 34-65-05-02	-----	10.35	7.32	-----	8.38	5.92
	P 35-65-05-02	-----	8.68	6.14	-----	10.08	7.13
	P 36-65-05-02	-----	9.2	6.50	-----	9.65	6.82

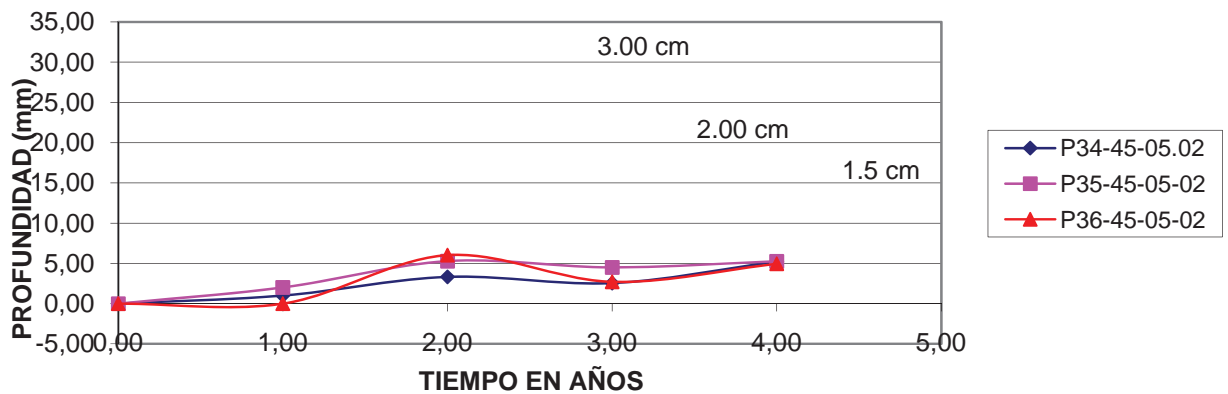
Tercer Año (04 de diciembre de 2006)

MEZCLA	PROBETA	ESTACIÓN MORELIA, MICHOACÁN					
		CARA EXPUESTA			CARA RESGUARDADA		
		ρ (K Ω)	X_{co_2} (mm)	K (mm/a ^{1/2})	ρ (K Ω)	X_{co_2} (mm)	K (mm/a ^{1/2})
a/c = 0.45	P 34-45-05-02	-----	2.55	1.47	-----	2.00	1.15
	P 35-45-05-02	-----	4.50	2.60	-----	3.75	2.17
	P 36-45-05-02	-----	2.70	1.56	-----	3.60	2.08
a/c = 0.65	P 34-65-05-02	-----	10.20	5.89	-----	9.20	5.31
	P 35-65-05-02	-----	11.00	6.35	-----	11.00	6.35
	P 36-65-05-02	-----	10.00	5.77	-----	10.10	5.83

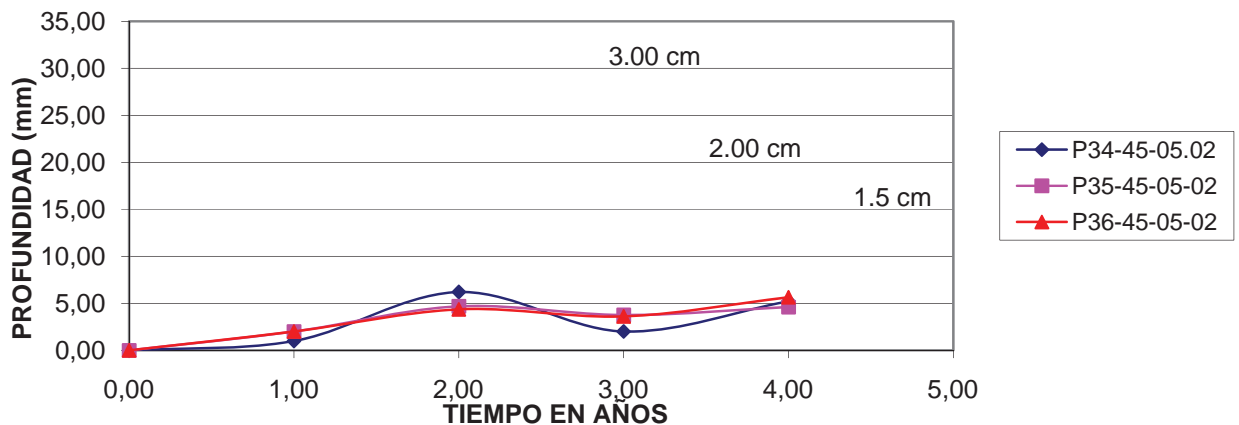
Tercer Año (11 de diciembre de 2007)

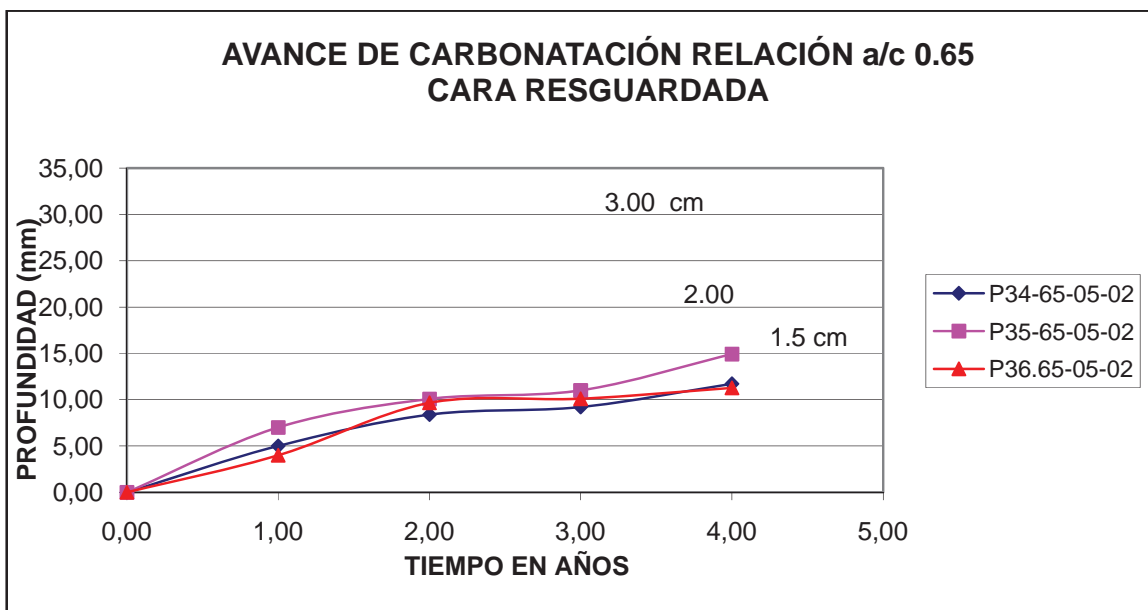
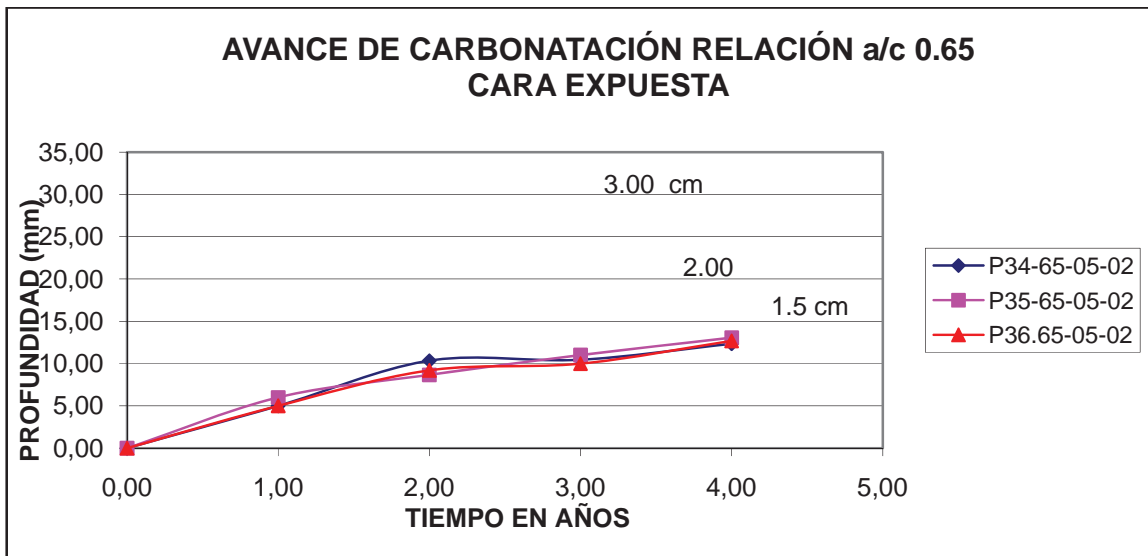
MEZCLA	PROBETA	ESTACIÓN MORELIA, MICHOACÁN					
		CARA EXPUESTA			CARA RESGUARDADA		
		ρ (K Ω)	X_{CO_2} (mm)	K (mm/a-1/2)	ρ (K Ω)	X_{CO_2} (mm)	K (mm/a-1/2)
a/c = 0.45	P 34-45-05-02	-----	5.21	2.61	-----	5.21	2.61
	P 35-45-05-02	-----	5.25	2.63	-----	4.60	2.30
	P 36-45-05-02	-----	4.95	2.48	-----	5.65	2.83
a/c = 0.65	P 34-65-05-02	-----	12.35	6.18	-----	11.70	5.85
	P 35-65-05-02	-----	13.07	6.54	-----	14.91	7.46
	P 36-65-05-02	-----	12.68	6.34	-----	12.68	5.64

AVANCE DE CARBONATACIÓN RELACIÓN a/c 0.45
CARA EXPUESTA



AVANCE DE CARBONATACIÓN RELACIÓN a/c 0.45
CARA RESGUARDADA





Viendo las gráficas y los resultados obtenidos al realizar la prueba de carbonatación, se puede decir que efectivamente el avance es mayor en aquellas probetas que tienen la relación agua/cemento (a/c) de 0.65, que las que lo tienen

de 0.45, y esto es lógico, ya que las de menor relación a/c , tienen menor porosidad y por tanto están más compactas que aquellas de mayor relación.

Pero al observar las de relación a/c de 0.45, podemos ver que la gráfica nos dice que el avance ocurrió con mayor intensidad en el periodo del primer al segundo año, no así en el primer año y en el tercero.

Esto no ocurre en las probetas con la relación a/c de 0.65, ya que desde el principio se notó un claro avance en la carbonatación, aunque en el último ya no fue tanto, aun así se puede observar que es mucho mayor que en las otras probetas.

IX. 2. PRUEBAS DE VELOCIDAD DE CORROSIÓN, POTENCIAL DE CORRSIÓN Y RESISTIVIDAD ELÉCTRICA, CON EL EQUIPO GCORR

Fecha: 22 de Octubre de 2003

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.025	-109.2		2.04	
		428	2.0	0.040	-105.7		1.20	
		427	1.5	0.071	-82.6		1.12	
	C2	432	1.5	0.085	-85.3		2.51	
		431	2.0	0.029	-92.6		2.46	
		430	3.0	0.037	-65.0		3.44	
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.081	-141.2		2.47	
		437	2.0	0.056	-44.4		2.10	
		438	1.5	0.082	-18.8		2.26	
	C2	433	1.5	0.109	-82.9		0.88	
		434	2.0	0.076	-72.9		0.90	
		435	3.0	0.072	-47.3		1.16	
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.111	-225.9		1.64	
		401	2.0	0.171	-88.9		1.08	
		402	1.5	0.206	-280.7		1.28	
	C2	397	1.5	0.046	-123.7		3.22	
		398	2.0	0.043	-83.7		3.37	
		399	3.0	0.041	-61.6		4.05	
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.272	-333.1		1.24	
		440	2.0	0.041	-113.3		1.01	
		439	1.5	0.062	-117.3		1.04	
	C2	444	1.5	0.124	-84.6		2.11	
		443	2.0	0.063	-81.9		1.80	
		442	3.0	0.027	-92.1		2.24	
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.054	-244.5		2.54	
		500	2.0	0.082	-37.3		1.78	
		499	1.5	0.060	-89.1		1.20	
	C2	504	1.5	0.058	-139.8		0.96	
		503	2.0	0.043	-119.1		1.57	
		502	3.0	0.039	-99.2		2.58	
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.021	-117.0		2.17	
		407	2.0	0.067	-80.2		2.18	
		408	1.5	0.038	-72.0		2.83	
	C2	403	1.5	0.023	-103.1		3.51	
		404	2.0	0.069	-82.1		2.90	
		405	3.0	0.024	-82.5		3.40	

Fecha: 03 de Diciembre de 2003

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.021	-80.0			3.21
		428	2.0	0.030	-79.2			2.23
		427	1.5	0.056	-72.0			2.19
	C2	432	1.5	0.075	-15.0			2.90
		431	2.0	0.014	-34.0			2.96
		430	3.0	0.031	-46.9			3.81
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.095	-197.7			2.92
		437	2.0	0.058	-79.1			2.42
		438	1.5	0.095	-90.2			2.22
	C2	433	1.5	0.071	-69.7			1.48
		434	2.0	0.044	-50.0			1.48
		435	3.0	0.050	-20.6			1.57
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.061	-107.1			2.20
		401	2.0	0.034	-86.7			1.86
		402	1.5	0.064	-125.6			1.50
	C2	397	1.5	0.065	-20.35			1.66
		398	2.0	0.111	-240.1			2.86
		399	3.0	0.080	-225.3			3.78
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.038	-116.0			1.64
		440	2.0	0.072	-99.2			1.34
		439	1.5	0.051	-104.3			1.26
	C2	444	1.5	0.136	-84.8			1.44
		443	2.0	0.128	-77.0			1.70
		442	3.0	0.037	-90.5			2.48
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.029	-124.6			2.24
		500	2.0	0.102	-112.6			1.64
		499	1.5	0.044	-129.4			1.36
	C2	504	1.5	0.044	-214.6			1.34
		503	2.0	0.040	-116.4			1.96
		502	3.0	0.041	-100.1			2.48
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.050	-122.1			1.40
		407	2.0	0.072	-105.2			1.86
		408	1.5	0.020	-119.6			2.45
	C2	403	1.5	0.023	-117.6			3.09
		404	2.0	0.060	-102.4			2.38
		405	3.0	0.023	-132.7			1.61

Fecha: 24 de Febrero de 2004

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.010	-69.9			3.64
		428	2.0	0.020	-73.3			2.20
		427	1.5	0.032	-68.5			2.41
	C2	432	1.5	0.038	-45.8			2.42
		431	2.0	0.015	-30.6			2.77
		430	3.0	0.029	22.2			4.20
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.034	-67.5			2.74
		437	2.0	0.023	-64.4			2.32
		438	1.5	0.038	-69.5			2.20
	C2	433	1.5	0.021	65.5			2.04
		434	2.0	0.028	-72.3			1.35
		435	3.0	0.024	-46.5			2.03
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.018	-78.1			3.05
		401	2.0	0.091	-67.1			1.89
		402	1.5	0.028	-73.9			2.54
	C2	397	1.5	0.077	-271.3			2.80
		398	2.0	0.029	-53.0			3.68
		399	3.0	0.036	-206.0			5.30
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.022	-68.1			2.15
		440	2.0	0.035	-63.6			1.75
		439	1.5	0.024	-70.2			2.21
	C2	444	1.5	0.048	-56.7			1.94
		443	2.0	0.060	-44.4			2.12
		442	3.0	0.026	-73.8			3.03
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.012	-85.2			5.33
		500	2.0	0.020	-69.6			4.17
		499	1.5	0.016	-99.9			4.48
	C2	504	1.5	0.012	-64.5			3.56
		503	2.0	0.072	-269.6			3.24
		502	3.0	0.023	-37.8			3.31
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.010	-73.3			5.24
		407	2.0	0.041	-46.3			4.09
		408	1.5	0.006	-25.1			5.45
	C2	403	1.5	0.013	-42.9			4.72
		404	2.0	0.024	8.0			5.72
		405	3.0	0.007	-2.7			7.42

Fecha: 27 de Mayo de 2004

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.013	-52.4			4.22
		428	2.0	0.028	-61.4			2.59
		427	1.5	0.036	-63.4			2.55
	C2	432	1.5	0.057	-70.8			3.20
		431	2.0	0.019	-63.2			4.04
		430	3.0	0.016	-48.1			5.78
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.072	-100.7			1.58
		437	2.0	0.064	-84.9			1.15
		438	1.5	0.036	-90.2			0.94
	C2	433	1.5	0.051	-76.4			2.24
		434	2.0	0.019	-67.7			1.95
		435	3.0	0.015	-62.4			2.42
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.023	-67.8			1.83
		401	2.0	0.059	-32.8			0.97
		402	1.5	0.046	-31.9			1.21
	C2	397	1.5	0.023	-120.3			0.94
		398	2.0	0.074	-57.3			1.15
		399	3.0	0.059	-56.5			1.58
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.043	-90.6			1.62
		440	2.0	0.107	-91.8			1.19
		439	1.5	0.052	-97.9			1.09
	C2	444	1.5	0.097	-97.7			1.00
		443	2.0	0.053	-87.7			1.38
		442	3.0	0.045	-201.4			2.18
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.024	-115.1			2.00
		500	2.0	0.134	-106.3			1.26
		499	1.5	0.066	-113.2			1.03
	C2	504	1.5	0.008	-117.6			1.00
		503	2.0	0.015	-103.3			2.93
		502	3.0	0.023	-99.6			2.31
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.004	-107.5			0.70
		407	2.0	0.057	-216.4			1.04
		408	1.5	0.058	-340.8			0.84
	C2	403	1.5	0.019	-116.0			1.08
		404	2.0	0.024	-96.1			1.36
		405	3.0	0.038	-379.9			2.05

Fecha: 29 de Julio de 2004

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.029	-94.4		1.77	
		428	2.0	0.015	-73.2		1.06	
		427	1.5	0.074	-45.1		1.22	
	C2	432	1.5	0.183	-118.2		1.00	
		431	2.0	0.011	-118.9		0.82	
		430	3.0	0.014	-105.7		1.23	
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.026	-117.8		1.24	
		437	2.0	0.045	-98.1		1.00	
		438	1.5	0.119	-120.2		1.06	
	C2	433	1.5	0.016	-69.6		0.86	
		434	2.0	0.019	-64.8		0.86	
		435	3.0	0.050	-57.0		1.08	
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.041	-96.0		1.10	
		401	2.0	0.101	-78.4		0.68	
		402	1.5	0.063	-78.7		0.84	
	C2	397	1.5	0.088	-150.4		0.86	
		398	2.0	0.041	-152.1		0.68	
		399	3.0	0.036	-159.6		0.86	
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.056	-78.6		1.12	
		440	2.0	0.033	-80.5		0.94	
		439	1.5	0.035	-74.4		1.02	
	C2	444	1.5	0.126	-77.2		0.89	
		443	2.0	0.084	-80.5		0.93	
		442	3.0	0.065	-107.5		1.24	
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.046	-109.7		1.06	
		500	2.0	0.074	-103.5		0.92	
		499	1.5	0.046	-101.5		0.94	
	C2	504	1.5	0.032	-96.1		0.92	
		503	2.0	0.021	-163.6		0.88	
		502	3.0	0.098	-102.2		0.98	
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.033	-101.7		0.94	
		407	2.0	0.182	-100.0		0.85	
		408	1.5	0.043	-104.0		0.90	
	C2	403	1.5	0.021	-103.3		0.86	
		404	2.0	0.056	-106.9		0.74	
		405	3.0	0.036	-118.5		0.86	

Fecha: 26 de Diciembre de 2004

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.006	-54.5			2.43
		428	2.0	0.013	-38.8			1.34
		427	1.5	0.020	-25.8			2.04
	C2	432	1.5	0.012	-54.9			1.34
		431	2.0	0.052	-68.6			1.15
		430	3.0	0.009	-109.4			1.80
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.008	-84.3			2.06
		437	2.0	0.065	-59.2			1.52
		438	1.5	0.005	-70.3			0.65
	C2	433	1.5	0.026	-36.1			1.53
		434	2.0	0.009	-25.0			1.40
		435	3.0	0.008	-14.5			1.60
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.008	-54.4			1.86
		401	2.0	0.032	-37.3			1.23
		402	1.5	0.014	-43.5			1.61
	C2	397	1.5	0.016	-106.3			0.96
		398	2.0	0.014	-83.2			1.32
		399	3.0	0.014	-63.8			2.01
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.011	-118.3			1.54
		440	2.0	0.018	-43.6			1.57
		439	1.5	0.015	-34.8			1.83
	C2	444	1.5	0.031	-29.4			1.33
		443	2.0	0.012	-112.3			1.52
		442	3.0	0.014	-251.1			1.65
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.008	-72.0			1.80
		500	2.0	0.005	-41.5			0.21
		499	1.5	0.016	-28.4			1.61
	C2	504	1.5	0.007	-62.9			3.48
		503	2.0	0.029	-124.5			6.60
		502	3.0	0.008	-65.0			1.75
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.011	-5.3			1.58
		407	2.0	0.023	4.3			1.37
		408	1.5	0.032	34.2			1.58
	C2	403	1.5	0.013	-54.9			1.36
		404	2.0	0.018	-20.0			1.24
		405	3.0	0.013	-21.6			1.61

Fecha: 01 de Febrero de 2005

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A				
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.007	-65.0		4.11
		428	2.0	0.006	-64.8		2.01
		427	1.5	0.015	-56.9		2.67
	C2	432	1.5	0.020	-69.0		1.97
		431	2.0	0.010	-91.6		1.76
		430	3.0	0.019	-126.7		2.75
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.017	-67.6		2.21
		437	2.0	0.018	-73.1		2.17
		438	1.5	0.027	-94.8		2.67
	C2	433	1.5	0.018	-45.5		2.93
		434	2.0	0.017	-57.5		1.82
		435	3.0	0.025	-58.1		3.90
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.020	-61.8		2.14
		401	2.0	0.066	-66.6		1.75
		402	1.5	0.025	-100.7		2.79
	C2	397	1.5	0.026	-100.5		1.70
		398	2.0	0.012	-109.6		1.80
		399	3.0	0.029	-115.8		2.00
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.014	-71.9		2.57
		440	2.0	0.009	-39.7		4.02
		439	1.5	0.014	-181.4		2.47
	C2	444	1.5	0.021	-35.7		2.45
		443	2.0	0.018	-55.4		3.04
		442	3.0	0.012	-256.9		2.49
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.016	-90.8		2.72
		500	2.0	0.054	-83.4		2.25
		499	1.5	0.021	-85.9		2.00
	C2	504	1.5	0.010	-77.6		2.14
		503	2.0	0.011	-90.4		3.91
		502	3.0	0.015	-80.1		2.07
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.010	11.9		2.95
		407	2.0	0.009	97.6		3.24
		408	1.5	0.013	83.1		3.84
	C2	403	1.5	0.011	9.0		2.48
		404	2.0	0.015	15.3		2.23
		405	3.0	0.015	-20.0		2.37

Fecha: 03 de Mayo de 2005

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.008	-87.1			4.18
		428	2.0	0.017	-74.6			2.71
		427	1.5	0.019	-78.4			3.70
	C2	432	1.5	0.117	-223.4			3.23
		431	2.0	0.027	-94.5			2.21
		430	3.0	0.034	-193.0			3.36
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.019	-88.9			4.53
		437	2.0	0.013	-75.4			2.87
		438	1.5	0.017	-101.4			3.64
	C2	433	1.5	0.020	-79.6			2.46
		434	2.0	0.010	-107.1			3.18
		435	3.0	0.012	-64.1			2.71
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.013	-86.7			4.90
		401	2.0	0.035	-90.1			3.23
		402	1.5	0.014	-100.5			4.53
	C2	397	1.5	0.029	-164.5			4.46
		398	2.0	0.036	-100.3			4.28
		399	3.0	0.015	243.5			5.72
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.024	-39.9			3.04
		440	2.0	0.023	-95.5			3.34
		439	1.5	0.029	-14.9			3.63
	C2	444	1.5	0.027	-49.0			3.07
		443	2.0	0.027	-47.5			2.29
		442	3.0	0.014	-52.0			3.65
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.011	-193.6			3.84
		500	2.0	0.034	-74.8			3.21
		499	1.5	0.021	-87.8			4.41
	C2	504	1.5	0.007	-94.3			5.28
		503	2.0	0.012	-289.7			3.60
		502	3.0	0.051	-336.1			4.00
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.011	-101.7			5.10
		407	2.0	0.039	-87.5			3.84
		408	1.5	0.006	-83.8			5.58
	C2	403	1.5	0.011	-91.9			5.28
		404	2.0	0.038	-102.7			3.12
		405	3.0	0.008	-131.8			4.33

Fecha: 25 de Mayo de 2005

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.009	-22.0			7.75
		428	2.0	0.009	-5.4			5.39
		427	1.5	0.013	-14.9			6.92
	C2	432	1.5	0.024	-3.7			7.28
		431	2.0	0.012	-32.9			4.97
		430	3.0	0.016	-25.0			5.95
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.022	-89.0			5.15
		437	2.0	0.012	-68.3			3.77
		438	1.5	0.011	-64.2			4.61
	C2	433	1.5	0.033	-197.3			4.45
		434	2.0	0.010	-69.7			3.10
		435	3.0	0.009	-64.3			4.14
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.016	-87.3			6.31
		401	2.0	0.042	-80.6			4.11
		402	1.5	0.012	-84.4			6.68
	C2	397	1.5	0.018	-104.6			6.02
		398	2.0	0.025	-94.2			4.59
		399	3.0	0.024	-221.2			5.80
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.017	-24.4			5.63
		440	2.0	0.030	-29.1			4.72
		439	1.5	0.013	-28.2			5.98
	C2	444	1.5	0.028	-29.7			5.05
		443	2.0	0.034	-37.3			4.06
		442	3.0	0.019	-64.1			4.90
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.006	-101.7			5.05
		500	2.0	0.018	-83.3			3.83
		499	1.5	0.012	-95.1			5.50
	C2	504	1.5	0.009	-90.7			7.46
		503	2.0	0.017	-225.4			6.64
		502	3.0	0.009	-91.7			5.01
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.019	-68.5			7.69
		407	2.0	0.019	-64.2			4.70
		408	1.5	0.006	-72.8			6.47
	C2	403	1.5	0.010	-92.1			6.37
		404	2.0	0.017	-129.1			3.56
		405	3.0	0.011	-151.2			4.83

Fecha: 22 Junio de 2005

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.015	-46.7			8.39
		428	2.0	0.017	-39.2			5.81
		427	1.5	0.023	-101.0			7.75
	C2	432	1.5	0.050	-31.7			6.90
		431	2.0	0.016	-62.3			5.29
		430	3.0	0.022	-47.3			6.93
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.055	-96.2			6.20
		437	2.0	0.036	-61.0			4.39
		438	1.5	0.073	-55.4			5.84
	C2	433	1.5	0.032	-59.1			8.90
		434	2.0	0.033	-59.3			4.51
		435	3.0	0.039	-54.3			5.30
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.038	-84.3			6.66
		401	2.0	0.077	-82.9			4.57
		402	1.5	0.018	-72.3			6.78
	C2	397	1.5	0.038	-197.7			6.67
		398	2.0	0.031	-129.5			5.19
		399	3.0	0.053	-137.7			6.42
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.033	-45.7			5.59
		440	2.0	0.045	-46.8			4.99
		439	1.5	0.019	-47.2			6.41
	C2	444	1.5	0.074	-29.5			6.02
		443	2.0	0.084	-33.7			4.47
		442	3.0	0.023	-53.4			6.06
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.022	-103.7			5.64
		500	2.0	0.036	-83.5			4.29
		499	1.5	0.016	-81.9			5.60
	C2	504	1.5	0.015	-90.5			8.48
		503	2.0	0.026	-254.3			5.26
		502	3.0	0.042	-228.9			5.63
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.018	-98.8			6.66
		407	2.0	0.049	-79.8			5.57
		408	1.5	0.020	-82.0			7.48
	C2	403	1.5	0.016	-78.0			9.25
		404	2.0	0.049	-77.9			5.37
		405	3.0	0.030	-118.7			6.53

Fecha: 28 de Septiembre de 2005

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.013	-90.1			2.70
		428	2.0	0.015	-70.2			1.78
		427	1.5	0.034	-59.5			2.06
	C2	432	1.5	0.085	-52.1			1.92
		431	2.0	0.025	-67.4			1.43
		430	3.0	0.035	-197.8			1.89
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.027	-233.2			1.77
		437	2.0	0.030	-113.4			1.39
		438	1.5	0.017	-63.2			2.15
	C2	433	1.5	0.023	-22.8			1.85
		434	2.0	0.070	-81.1			1.45
		435	3.0	0.020	-84.2			1.89
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.009	-81.4			1.48
		401	2.0	0.013	-68.0			1.02
		402	1.5	0.011	-219.6			1.50
	C2	397	1.5	0.009	-123.3			1.10
		398	2.0	0.012	-210.2			1.08
		399	3.0	0.010	-152.0			1.32
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.012	-120.7			2.15
		440	2.0	0.021	-92.3			1.57
		439	1.5	0.066	-162.3			1.78
	C2	444	1.5	0.028	-77.4			3.83
		443	2.0	0.024	-111.4			1.37
		442	3.0	0.030	-53.5			1.92
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.017	-88.2			1.14
		500	2.0	0.045	-80.6			1.25
		499	1.5	0.016	-93.5			1.12
	C2	504	1.5	0.023	-167.6			1.43
		503	2.0	0.005	-185.6			7.67
		502	3.0	0.014	-171.8			1.50
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.009	-92.2			1.22
		407	2.0	0.011	-77.1			0.94
		408	1.5					
	C2	403	1.5	0.008	-93.8			5.78
		404	2.0	0.007	-111.7			0.55
		405	3.0	0.008	-138.2			3.39

Fecha: 18 de Agosto de 2006

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.02	-264.18		8.64	
		428	2.0	0.08	-306.16		2.36	
		427	1.5	0.04	-35.12		1.85	
	C2	432	1.5	0.06	-51.63		25.57	
		431	2.0	0.04	-194.32		22.37	
		430	3.0	0.06	-235.69		1.99	
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.05	-65.03		48.39	
		437	2.0	0.04	-61.89		48.21	
		438	1.5	0.02	-26.34		42.81	
	C2	433	1.5	0.02	-25.66		54.75	
		434	2.0	0.10	-104.68		54.24	
		435	3.0	0.01	6.57		38.65	
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.03	26.37		3.23	
		401	2.0	0.03	82.43		7.95	
		402	1.5	0.01	56.70		124.23	
	C2	397	1.5	0.03	-157.48		38.75	
		398	2.0	0.01	-6.36		36.8	
		399	3.0	0.03	-111.81		7.82	
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.10	-250.80		3.06	
		440	2.0	0.07	-103.90		1.29	
		439	1.5	0.03	-56.17		2.73	
	C2	444	1.5	0.08	-13.17		4.09	
		443	2.0	0.15	-138.64		7.11	
		442	3.0	0.04	-61.28		3.66	
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.08	-226.92		4.86	
		500	2.0	0.05	-199.15		9.18	
		499	1.5	0.02	-70.08		12.91	
	C2	504	1.5	0.03	-72.77		3.92	
		503	2.0	0.06	-128.62		24.64	
		502	3.0	0.02	-202.47		26.78	
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.01	-63.64		3.75	
		407	2.0	0.06	-112.49		2.31	
		408	1.5	0.03	-99.47		2.31	
	C2	403	1.5	0.01	-37.44		13.83	
		404	2.0	0.05	-170.61		8.21	
		405	3.0	0.05	-105.10		3.84	

Fecha: 30 de Marzo de 2007

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.013	-56.2			4.42
		428	2.0	0.024	-39.0			2.50
		427	1.5	0.025	-36.8			3.41
	C2	432	1.5	0.027	10.9			3.22
		431	2.0	0.015	-12.9			2.55
		430	3.0	0.028	-35.6			3.05
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.031	-56.5			3.31
		437	2.0	0.015	-120.8			2.58
		438	1.5	0.009	-42.9			2.98
	C2	433	1.5	0.050	-53.1			3.29
		434	2.0	0.031	-62.0			2.69
		435	3.0	0.037	-146.3			3.43
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.027	-19.1			4.70
		401	2.0	0.062	-9.8			3.46
		402	1.5	0.023	-7.7			4.94
	C2	397	1.5	0.016	-48.5			3.76
		398	2.0	0.047	-37.4			3.33
		399	3.0	0.027	-28.9			4.28
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.008	-68.4			3.13
		440	2.0	0.049	-34.7			2.58
		439	1.5	0.006	-12.9			3.18
	C2	444	1.5	0.018	-12.2			2.98
		443	2.0	0.010	-47.9			2.30
		442	3.0	0.009	-26.9			2.89
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.029	-256.7			4.57
		500	2.0	0.016	-134.3			3.70
		499	1.5	0.012	-67.5			6.20
	C2	504	1.5	0.017	-61.6			3.76
		503	2.0	0.027	-66.8			3.26
		502	3.0	0.012	-74.8			4.48
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.014	1.3			4.41
		407	2.0	0.037	22.3			3.87
		408	1.5	0.015	23.1			5.09
	C2	403	1.5	0.012	-39.1			4.47
		404	2.0	0.024	-64.3			2.97
		405	3.0	0.016	9.3			3.96

Fecha: 30 de Mayo de 2007

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.01	-77.67		110.02	
		428	2.0	0.02	-184.98		92.26	
		427	1.5	0.09	-177.98		81.38	
	C2	432	1.5	0.02	88.81		68.57	
		431	2.0	0.01	11.98		52.39	
		430	3.0	0.03	-79.60		57.02	
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.03	-106.74		68.64	
		437	2.0	0.02	-68.88		63.01	
		438	1.5	0.01	-130.77		62.73	
	C2	433	1.5	0.02	59.48		73.63	
		434	2.0	0.02	-12.95		69.28	
		435	3.0	0.02	-41.69		75.51	
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.04	-59.51		78.65	
		401	2.0	0.03	-53.49		75.05	
		402	1.5	0.02	36.94		11.57	
	C2	397	1.5	0.04	-132.74		81.92	
		398	2.0	0.04	-101.68		78.31	
		399	3.0	0.03	-18.25		80.19	
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.01	-48.39		81.64	
		440	2.0	0.02	3.27		71.11	
		439	1.5	0.02	-43.73		72.66	
	C2	444	1.5	0.04	-96.09		84.29	
		443	2.0	0.03	22.40		69.89	
		442	3.0	0.03	15.40		71.33	
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.38	-147.41		64.69	
		500	2.0	0.02	-50.41		61.53	
		499	1.5	0.03	-152.34		63.14	
	C2	504	1.5	0.02	-29.88		66.41	
		503	2.0	0.03	-131.83		65.19	
		502	3.0	0.02	-52.02		67.23	
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.02	-66.32		85.25	
		407	2.0	0.04	-131.10		85.32	
		408	1.5	0.02	-7.97		79.63	
	C2	403	1.5	0.03	-131.01		80.13	
		404	2.0	0.03	59.01		75.37	
		405	3.0	0.03	-10.30		75.47	

Fecha: 06 de junio de 2007

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.007	-47.2			9.24
		428	2.0	0.005	-41.3			3.67
		427	1.5	0.007	-29.0			4.49
	C2	432	1.5	0.009	13.1			4.84
		431	2.0	0.007	-2.9			3.65
		430	3.0	0.006	-18.3			4.49
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.021	-72.8			3.84
		437	2.0	0.023	-143.6			3.23
		438	1.5	0.016	-43.9			4.47
	C2	433	1.5	0.027	-60.7			4.10
		434	2.0	0.013	-54.3			3.05
		435	3.0	0.021	-124.4			4.71
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.010	-9.3			5.75
		401	2.0	0.009	-6.4			4.23
		402	1.5	0.018	-25.1			4.57
	C2	397	1.5	0.009	-57.6			4.35
		398	2.0	0.011	-29.8			4.37
		399	3.0	0.013	-30.4			6.10
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.009	-62.3			3.77
		440	2.0	0.020	-74.5			2.50
		439	1.5	0.019	-67.5			3.90
	C2	444	1.5	0.071	-13.0			3.61
		443	2.0	0.018	-36.9			2.72
		442	3.0	0.022	-36.9			3.58
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.009	-63.8			5.13
		500	2.0	0.014	-166.9			5.34
		499	1.5	0.010	-74.7			5.84
	C2	504	1.5	0.014	-59.3			4.54
		503	2.0	0.016	-55.8			4.37
		502	3.0	0.006	-62.1			5.37
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.008	21.5			5.29
		407	2.0	0.005	-11.7			4.71
		408	1.5	0.006	-3.4			3.92
	C2	403	1.5	0.013	-24.9			3.81
		404	2.0	0.014	-23.8			3.21
		405	3.0	0.022	-9.1			4.87

Fecha: 26 de junio de 2007

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.02	-37.24		4.76	
		428	2.0	0.02	-115.71		5.32	
		427	1.5	0.01	-43.73		10.71	
	C2	432	1.5	0.04	-87.58		3.80	
		431	2.0	0.05	-195.36		2.44	
		430	3.0	0.02	-102.91		8.00	
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.05	-73.94		3.25	
		437	2.0	0.04	-237.71		5.25	
		438	1.5	0.02	-40.00		10.47	
	C2	433	1.5	0.03	-55.19		6.33	
		434	2.0	0.05	-39.56		3.06	
		435	3.0	0.03	-20.18		5.01	
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.03	19.41		4.46	
		401	2.0	0.05	34.61		4.73	
		402	1.5	0.05	-54.19		1.59	
	C2	397	1.5	0.04	-193.95		2.88	
		398	2.0	0.04	-69.63		2.75	
		399	3.0	0.01	-61.44		20.67	
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.02	-100.62		11.50	
		440	2.0	0.02	-104.61		13.10	
		439	1.5	0.01	-25.60		11.26	
	C2	444	1.5	0.03	2.27		6.03	
		443	2.0	0.04	-47.43		7.01	
		442	3.0	0.01	19.91		26.40	
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.01	-31.82		12.92	
		500	2.0	0.02	-59.50		8.81	
		499	1.5	0.03	-177.23		2.50	
	C2	504	1.5	0.02	-66.11		3.55	
		503	2.0	0.03	7.11		4.44	
		502	3.0	0.01	-9.62		8.65	
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.02	10.92		4.91	
		407	2.0	0.02	72.10		13.87	
		408	1.5	0.01	-3.20		11.77	
	C2	403	1.5	0.01	15.82		9.18	
		404	2.0	0.02	-42.92		14.75	
		405	3.0	0.02	-17.20		8.70	

Fecha: 04 de julio de 2007

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (μA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.01	-8.34		6.35	
		428	2.0	0.02	-80.75		5.04	
		427	1.5	0.02	-4.51		4.07	
	C2	432	1.5	0.04	43.47		3.97	
		431	2.0	0.03	-114.64		2.83	
		430	3.0	0.03	-52.08		4.47	
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.04	-62.81		3.51	
		437	2.0	0.04	-155.36		2.76	
		438	1.5	0.02	-67.88		8.41	
	C2	433	1.5	0.04	23.60		4.04	
		434	2.0	0.03	-12.18		3.66	
		435	3.0	0.03	13.53		4.25	
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.02	32.86		5.99	
		401	2.0	0.07	35.01		3.16	
		402	1.5	0.03	-39.83		2.23	
	C2	397	1.5	0.03	-192.73		4.82	
		398	2.0	0.05	-43.44		2.72	
		399	3.0	0.03	-86.96		6.34	
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.01	1.74		10.08	
		440	2.0	0.02	-70.55		13.69	
		439	1.5	0.02	-99.14		6.70	
	C2	444	1.5	0.04	28.52		4.42	
		443	2.0	0.04	-30.59		5.78	
		442	3.0	0.02	43.32		6.49	
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.02	-80.14		11.37	
		500	2.0	0.02	-31.75		4.25	
		499	1.5	0.02	-62.42		4.93	
	C2	504	1.5	0.02	-43.63		5.06	
		503	2.0	0.03	29.50		4.79	
		502	3.0	0.01	-24.89		9.14	
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.02	-66.78		7.14	
		407	2.0	0.02	51.05		5.37	
		408	1.5	0.02	-38.24		3.55	
	C2	403	1.5	0.01	72.10		8.22	
		404	2.0	0.02	-45.98		11.69	
		405	3.0	0.02	54.39		7.69	

Fecha: 11 de julio de 2007

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.01	-39.54		6.51	
		428	2.0	0.03	-178.59		3.71	
		427	1.5	0.02	-9.75		4.62	
	C2	432	1.5	0.03	27.14		4.12	
		431	2.0	0.02	-135.74		4.24	
		430	3.0	0.04	-117.39		4.08	
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.05	-145.24		3.98	
		437	2.0	0.04	-144.83		2.74	
		438	1.5	0.03	-53.48		4.68	
	C2	433	1.5	0.03	-20.81		5.92	
		434	2.0	0.04	-49.33		3.00	
		435	3.0	0.05	-50.71		4.26	
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.02	19.39		6.16	
		401	2.0	0.06	13.85		3.80	
		402	1.5	0.02	-75.80		3.96	
	C2	397	1.5	0.06	-214.22		1.85	
		398	2.0	0.03	-102.45		5.00	
		399	3.0	0.03	-105.42		4.89	
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.02	-134.61		7.40	
		440	2.0	0.02	-105.42		11.19	
		439	1.5	0.03	-171.40		4.81	
	C2	444	1.5	0.06	25.17		2.75	
		443	2.0	0.08	-75.31		4.04	
		442	3.0	0.01	34.01		16.19	
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.02	-76.38		7.44	
		500	2.0	0.02	61.12		5.15	
		499	1.5	0.02	-109.44		2.79	
	C2	504	1.5	0.02	-59.34		3.50	
		503	2.0	0.03	-1.87		3.31	
		502	3.0	0.02	-216.89		10.44	
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.03	-146.03		4.02	
		407	2.0	0.03	-36.35		3.89	
		408	1.5	0.03	-129.96		3.68	
	C2	403	1.5	0.02	-91.72		4.59	
		404	2.0	0.03	-114.92		7.11	
		405	3.0	0.02	5.14		6.88	

Fecha: 20 de julio de 2007

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.02	-50.39		4.77	
		428	2.0	0.02	-146.92		4.44	
		427	1.5	0.02	3.39		4.89	
	C2	432	1.5	0.03	22.78		4.08	
		431	2.0	0.02	-63.14		3.55	
		430	3.0	0.02	-77.10		6.15	
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.03	-58.51		4.18	
		437	2.0	0.03	-107.93		3.16	
		438	1.5	0.02	-59.99		6.72	
	C2	433	1.5	0.03	-26.58		4.59	
		434	2.0	0.04	-42.84		3.32	
		435	3.0	0.03	-43.90		4.96	
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.02	27.68		5.78	
		401	2.0	0.06	31.73		3.54	
		402	1.5	0.03	-99.47		4.30	
	C2	397	1.5	0.03	-157.69		3.10	
		398	2.0	0.03	-52.30		4.28	
		399	3.0	0.03	-115.11		6.47	
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.02	-76.77		6.45	
		440	2.0	0.02	-79.40		8.45	
		439	1.5	0.04	-157.64		2.96	
	C2	444	1.5	0.04	41.06		2.98	
		443	2.0	0.14	-74.25		2.68	
		442	3.0	0.01	37.76		11.51	
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.02	-90.83		7.80	
		500	2.0	0.02	-46.95		4.84	
		499	1.5	0.02	-118.95		3.58	
	C2	504	1.5	0.02	-33.90		4.65	
		503	2.0	0.03	15.72		4.36	
		502	3.0	0.02	-150.11		8.73	
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.03	-100.07		3.77	
		407	2.0	0.04	-13.24		3.03	
		408	1.5	0.02	-116.52		5.08	
	C2	403	1.5	0.01	-67.55		11.18	
		404	2.0	0.04	-69.72		3.27	
		405	3.0	0.02	34.30		5.75	

Fecha: 03 de Agosto de 2007

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.02	-226.87		9.19	
		428	2.0	0.02	-139.65		6.87	
		427	1.5	0.02	-56.85		3.75	
	C2	432	1.5	0.07	-80.73		2.70	
		431	2.0	0.02	-140.04		4.07	
		430	3.0	0.03	-121.02		4.20	
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.06	-127.10		2.83	
		437	2.0	0.02	-159.65		5.49	
		438	1.5	0.03	-93.89		4.63	
	C2	433	1.5	0.05	-146.66		5.04	
		434	2.0	0.04	-77.63		4.00	
		435	3.0	0.05	-50.22		3.27	
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.02	23.72		5.31	
		401	2.0	0.04	12.11		4.78	
		402	1.5	0.04	-73.03		1.70	
	C2	397	1.5	0.04	-155.49		2.14	
		398	2.0	0.04	-169.62		4.41	
		399	3.0	0.04	-152.69		4.08	
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.01	-83.13		14.45	
		440	2.0	0.02	-114.75		13.42	
		439	1.5	0.02	-48.41		6.62	
	C2	444	1.5	0.08	47.55		3.33	
		443	2.0	0.04	-2.79		4.58	
		442	3.0	0.02	-131.39		14.22	
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.02	-76.90		6.18	
		500	2.0	0.04	-174.19		5.37	
		499	1.5	0.02	-115.28		5.37	
	C2	504	1.5	0.02	-15.19		2.71	
		503	2.0	0.05	-63.21		2.35	
		502	3.0	0.02	-198.25		6.21	
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.01	43.67		7.62	
		407	2.0	0.02	122.23		5.07	
		408	1.5	0.03	40.61		7.14	
	C2	403	1.5	0.01	46.61		9.93	
		404	2.0	0.03	29.66		6.09	
		405	3.0	0.01	86.57		7.99	

Fecha: 15 de Agosto de 2007

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (μA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.02	-168.58		4.85	
		428	2.0	0.02	-124.05		5.93	
		427	1.5	0.30	-165.72		1.55	
	C2	432	1.5	0.06	-24.15		2.37	
		431	2.0	0.03	-100.74		1.85	
		430	3.0	0.04	-49.16		3.08	
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.04	-76.15		4.16	
		437	2.0	0.03	-98.93		4.17	
		438	1.5	0.03	-19.76		3.24	
	C2	433	1.5	0.06	-38.34		2.58	
		434	2.0	0.03	-24.17		3.38	
		435	3.0	0.02	12.22		6.95	
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.02	38.38		7.20	
		401	2.0	0.08	-64.52		3.79	
		402	1.5	0.03	13.88		2.26	
	C2	397	1.5	0.04	-166.24		2.68	
		398	2.0	0.05	-102.84		3.07	
		399	3.0	0.03	-70.08		3.99	
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.02	-87.83		8.38	
		440	2.0	0.02	-56.20		8.15	
		439	1.5	0.02	-121.78		7.00	
	C2	444	1.5	0.06	27.83		3.39	
		443	2.0	0.03	-38.39		10.01	
		442	3.0	0.01	85.80		6.08	
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.03	63.34		4.77	
		500	2.0	0.01	90.36		22.33	
		499	1.5	0.02	82.51		4.19	
	C2	504	1.5	0.03	-21.76		3.61	
		503	2.0	0.05	36.57		2.47	
		502	3.0	0.01	-5.10		8.44	
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.01	42.68		6.09	
		407	2.0	0.03	102.50		4.49	
		408	1.5	0.02	28.07		6.53	
	C2	403	1.5	0.02	-86.29		4.89	
		404	2.0	0.05	21.38		3.06	
		405	3.0	0.02	53.05		5.80	

Fecha: 29 de Agosto de 2007

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.04	-194.71			3.80
		428	2.0	0.03	-190.79			3.02
		427	1.5	0.03	-43.12			3.20
	C2	432	1.5	0.05	-40.45			2.58
		431	2.0	0.02	-98.35			3.02
		430	3.0	0.04	-99.15			3.36
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.06	-124.63			2.23
		437	2.0	0.03	-123.55			4.25
		438	1.5	0.05	-109.12			2.47
	C2	433	1.5	0.05	-111.39			3.47
		434	2.0	0.04	-58.92			3.34
		435	3.0	0.03	-29.35			4.85
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.04	-23.15			1.71
		401	2.0	0.12	-110.28			2.30
		402	1.5	0.02	72.18			3.68
	C2	397	1.5	0.06	-201.89			1.81
		398	2.0	0.06	-163.94			2.57
		399	3.0	0.04	-118.94			3.34
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.01	35.75			7.72
		440	2.0	0.06	-72.97			3.85
		439	1.5	0.07	-78.26			3.12
	C2	444	1.5	0.03	-136.17			3.31
		443	2.0	0.02	-51.86			7.22
		442	3.0	0.03	-128.48			3.87
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.02	-36.88			5.46
		500	2.0	0.02	-192.69			13.55
		499	1.5	0.02	-151.33			2.84
	C2	504	1.5	0.05	-165.08			1.89
		503	2.0	0.06	-85.37			2.28
		502	3.0	0.02	-99.98			4.12
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.02	-91.67			4.70
		407	2.0	0.03	18.90			2.73
		408	1.5	0.04	-140.75			1.84
	C2	403	1.5	0.03	-187.96			2.56
		404	2.0	0.03	-80.70			3.98
		405	3.0	0.01	5.06			5.45

Fecha: 07 de Septiembre de 2007

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.01	-115.81		6.68	
		428	2.0	0.02	-152.34		4.62	
		427	1.5	0.03	-59.28		2.53	
	C2	432	1.5	0.03	-76.95		5.54	
		431	2.0	0.01	-112.18		64.40	
		430	3.0	0.03	-96.21		3.57	
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.03	-90.19		4.02	
		437	2.0	0.02	-41.39		6.00	
		438	1.5	0.04	-31.67		2.57	
	C2	433	1.5	0.05	-24.11		2.98	
		434	2.0	0.03	3.42		3.55	
		435	3.0	0.03	35.08		4.30	
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.02	35.08		3.21	
		401	2.0	0.12	-67.13		2.21	
		402	1.5	0.02	10.07		2.73	
	C2	397	1.5	0.05	-174.06		1.81	
		398	2.0	0.07	-141.41		2.00	
		399	3.0	0.06	-183.51		1.68	
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.03	18.15		3.11	
		440	2.0	0.10	-53.94		2.41	
		439	1.5	0.10	-4.39		2.30	
	C2	444	1.5	0.01	-17.14		6.15	
		443	2.0	0.06	-79.47		2.07	
		442	3.0	0.03	-89.81		3.23	
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.03	-0.18		2.97	
		500	2.0	0.02	19.24		7.58	
		499	1.5	0.03	-28.60		1.32	
	C2	504	1.5	0.03	-65.81		2.65	
		503	2.0	0.04	-30.36		2.66	
		502	3.0	0.02	-32.91		3.23	
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.01	0.68		11.09	
		407	2.0	0.02	66.96		5.70	
		408	1.5	0.02	-24.58		3.13	
	C2	403	1.5	0.01	-7.70		5.52	
		404	2.0	0.01	49.10		7.74	
		405	3.0	0.02	30.02		2.82	

Fecha: 18 de Septiembre de 2007

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.01	-108.97			11.15
		428	2.0	0.01	-99.87			5.82
		427	1.5	0.02	-27.64			3.52
	C2	432	1.5	0.04	-47.87			3.38
		431	2.0	0.02	-106.66			3.76
		430	3.0	0.03	-94.84			3.87
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.03	-94.28			4.56
		437	2.0	0.03	-102.95			4.05
		438	1.5	0.03	-73.54			4.15
	C2	433	1.5	0.03	-23.05			4.72
		434	2.0	0.02	-16.62			4.94
		435	3.0	0.04	-21.56			4.16
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.01	11.19			15.29
		401	2.0	0.06	-74.09			4.39
		402	1.5	0.03	-64.04			3.50
	C2	397	1.5	0.04	-184.07			2.50
		398	2.0	0.03	-95.49			4.09
		399	3.0	0.02	-55.93			5.06
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.03	42.23			3.22
		440	2.0	0.05	-44.43			4.22
		439	1.5	0.05	3.86			3.29
	C2	444	1.5	0.02	-63.99			3.51
		443	2.0	0.01	-388.95			5.92
		442	3.0	0.03	-107.28			3.21
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.03	-22.89			4.30
		500	2.0	0.02	-97.77			7.46
		499	1.5	0.02	-94.38			4.73
	C2	504	1.5	0.03	-126.20			2.94
		503	2.0	0.03	-32.84			4.05
		502	3.0	0.02	-112.22			5.39
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.02	14.83			4.87
		407	2.0	0.03	95.44			4.22
		408	1.5	0.02	56.63			4.11
	C2	403	1.5	0.01	-7.82			12.50
		404	2.0	0.02	105.67			6.83
		405	3.0	0.02	126.02			3.73

Fecha: 28 de Septiembre de 2007

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.02	-150.02			5.75
		428	2.0	0.06	-282.91			2.60
		427	1.5	0.02	-42.08			3.76
	C2	432	1.5	0.04	-11.33			2.86
		431	2.0	0.04	-231.34			2.67
		430	3.0	0.07	-267.09			3.96
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.02	-104.20			3.56
		437	2.0	0.03	-100.00			4.15
		438	1.5	0.03	-70.56			3.95
	C2	433	1.5	0.02	-28.35			4.02
		434	2.0	0.04	-18.20			4.34
		435	3.0	0.01	-30.45			3.86
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.04	-12.34			5.29
		401	2.0	0.06	-56.65			3.59
		402	1.5	0.03	-78.43			3.78
	C2	397	1.5	0.02	-124.07			3.50
		398	2.0	0.04	-88.49			3.79
		399	3.0	0.03	-65.73			4.06
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.01	41.00			21.11
		440	2.0	0.08	-122.21			3.99
		439	1.5	0.04	-10.76			4.36
	C2	444	1.5	0.04	-141.78			2.99
		443	2.0	0.03	-20.81			4.88
		442	3.0	0.05	-230.44			3.65
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.01	-52.39			7.30
		500	2.0	0.03	-105.47			5.56
		499	1.5	0.02	-98.88			4.73
	C2	504	1.5	0.03	-116.20			3.74
		503	2.0	0.03	-65.84			5.05
		502	3.0	0.02	-102.22			5.39
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.02	-21.64			2.28
		407	2.0	0.05	-46.70			2.01
		408	1.5	0.04	-140.07			2.12
	C2	403	1.5	0.03	-146.61			2.88
		404	2.0	0.01	-20.32			24.35
		405	3.0	0.02	40.34			2.89

Fecha: 17 de Octubre de 2007

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.01	-30.63		8.54	
		428	2.0	0.01	-17.02		6.86	
		427	1.5	0.02	9.17		3.98	
	C2	432	1.5	0.02	32.69		6.63	
		431	2.0	0.01	-105.38		10.48	
		430	3.0	0.02	-147.80		11.64	
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.02	13.17		9.04	
		437	2.0	0.01	-3.72		11.31	
		438	1.5	0.02	23.44		3.29	
	C2	433	1.5	0.03	37.18		5.34	
		434	2.0	0.02	34.16		8.74	
		435	3.0	0.01	-9.34		14.99	
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.02	28.34		5.98	
		401	2.0	0.06	8.61		3.89	
		402	1.5	0.02	30.66		4.82	
	C2	397	1.5	0.03	-100.97		3.37	
		398	2.0	0.02	22.37		5.00	
		399	3.0	0.03	-27.91		4.76	
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.01	47.00		18.35	
		440	2.0	0.04	40.07		5.73	
		439	1.5	0.02	59.63		9.09	
	C2	444	1.5	0.01	-0.35		9.72	
		443	2.0	0.01	36.06		13.89	
		442	3.0	0.02	-92.96		8.14	
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.02	-30.04		6.69	
		500	2.0	0.02	-111.46		8.72	
		499	1.5	0.01	30.65		8.18	
	C2	504	1.5	0.02	18.97		2.83	
		503	2.0	0.02	43.34		6.12	
		502	3.0	0.01	-1.95		7.73	
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.02	70.55		3.51	
		407	2.0	0.03	113.20		4.08	
		408	1.5	0.02	93.59		5.31	
	C2	403	1.5	0.01	149.14		16.64	
		404	2.0	0.02	186.92		10.58	
		405	3.0	0.01	192.51		13.24	

Fecha: 08 de Noviembre de 2007

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (μA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.01	-37.90		8.15	
		428	2.0	0.01	3.98		5.27	
		427	1.5	0.02	27.07		3.44	
	C2	432	1.5	0.04	53.05		4.35	
		431	2.0	0.02	-35.96		4.58	
		430	3.0	0.03	-126.43		5.92	
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.02	19.37		6.96	
		437	2.0	0.01	4.02		8.04	
		438	1.5	0.03	32.85		4.05	
	C2	433	1.5	0.04	37.97		3.63	
		434	2.0	0.02	33.38		6.15	
		435	3.0	0.02	1.61		8.43	
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.03	30.35		6.03	
		401	2.0	0.02	12.54		3.65	
		402	1.5	0.02	54.20		4.78	
	C2	397	1.5	0.03	-81.92		2.99	
		398	2.0	0.01	34.75		5.43	
		399	3.0	0.03	-45.68		5.34	
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.01	64.10		14.27	
		440	2.0	0.04	55.45		5.58	
		439	1.5	0.03	78.57		6.45	
	C2	444	1.5	0.01	43.02		6.48	
		443	2.0	0.03	56.20		4.20	
		442	3.0	0.02	-22.83		5.95	
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.02	-3.45		6.53	
		500	2.0	0.02	-115.24		9.58	
		499	1.5	0.01	61.93		9.81	
	C2	504	1.5	0.02	49.26		5.68	
		503	2.0	0.02	62.85		7.73	
		502	3.0	0.02	15.29		5.78	
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.01	180.53		11.53	
		407	2.0	0.02	209.20		12.60	
		408	1.5	0.01	181.42		10.62	
	C2	403	1.5	0.01	190.32		37.41	
		404	2.0	0.03	206.26		8.00	
		405	3.0	0.01	206.85		35.19	

Fecha: 14 de Noviembre de 2007

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.01	-14.04			17.45
		428	2.0	0.01	21.85			9.20
		427	1.5	0.02	39.76			6.06
	C2	432	1.5	0.03	65.55			5.09
		431	2.0	0.02	-15.90			6.39
		430	3.0	0.02	-74.60			7.86
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.02	36.94			9.21
		437	2.0	0.01	17.32			12.65
		438	1.5	0.02	47.41			8.87
	C2	433	1.5	0.03	53.98			6.33
		434	2.0	0.02	51.11			5.49
		435	3.0	0.01	16.63			20.27
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.02	31.99			6.84
		401	2.0	0.13	35.67			0.56
		402	1.5	0.02	26.29			3.60
	C2	397	1.5	0.02	-55.65			3.97
		398	2.0	0.03	40.13			4.95
		399	3.0	0.03	7.75			4.43
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.01	77.48			13.19
		440	2.0	0.02	75.59			11.43
		439	1.5	0.02	92.31			10.22
	C2	444	1.5	0.01	59.21			8.04
		443	2.0	0.02	68.63			12.79
		442	3.0	0.02	34.15			7.17
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.02	51.20			7.99
		500	2.0	0.02	-58.79			8.69
		499	1.5	0.01	59.57			8.87
	C2	504	1.5	0.02	61.33			4.40
		503	2.0	0.02	77.38			5.43
		502	3.0	0.02	36.94			6.51
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.01	189.38			11.84
		407	2.0	0.02	217.25			17.50
		408	1.5	0.01	196.43			20.89
	C2	403	1.5	0.01	202.58			18.50
		404	2.0	0.01	216.98			20.47
		405	3.0	0.01	208.56			13.88

Fecha: 14 de Noviembre de 2007

Área: 33 cm²

VIGA	CARA	No. VAR	SENSOR A					
			REC. (cm)	Icorr (µA/cm ²)	Pot (mV)	Temp (°C)	HR(%)	Resist. Eléc. (KΩ)
VIGA 1 V-427-432-045-05-03	C1	429	3.0	0.01	-14.04			17.45
		428	2.0	0.01	21.85			9.20
		427	1.5	0.02	39.76			6.06
	C2	432	1.5	0.03	65.55			5.09
		431	2.0	0.02	-15.90			6.39
		430	3.0	0.02	-74.60			7.86
VIGA 2 V-433-438-045-05-03	C1	436	3.0	0.02	36.94			9.21
		437	2.0	0.01	17.32			12.65
		438	1.5	0.02	47.41			8.87
	C2	433	1.5	0.03	53.98			6.33
		434	2.0	0.02	51.11			5.49
		435	3.0	0.01	16.63			20.27
VIGA 3 V-397-402-065-05-01	C1	400	3.0	0.02	31.99			6.84
		401	2.0	0.13	35.67			0.56
		402	1.5	0.02	26.29			3.60
	C2	397	1.5	0.02	-55.65			3.97
		398	2.0	0.03	40.13			4.95
		399	3.0	0.03	7.75			4.43
VIGA 4 V-439-444-045-05-03	C1	441	3.0	0.01	77.48			13.19
		440	2.0	0.02	75.59			11.43
		439	1.5	0.02	92.31			10.22
	C2	444	1.5	0.01	59.21			8.04
		443	2.0	0.02	68.63			12.79
		442	3.0	0.02	34.15			7.17
VIGA 5 V-499-504-065-06-01	C1	501	3.0	0.02	51.20			7.99
		500	2.0	0.02	-58.79			8.69
		499	1.5	0.01	59.57			8.87
	C2	504	1.5	0.02	61.33			4.40
		503	2.0	0.02	77.38			5.43
		502	3.0	0.02	36.94			6.51
VIGA 6 V-403-408-065-05-01	C1	406	3.0	0.01	189.38			11.84
		407	2.0	0.02	217.25			17.50
		408	1.5	0.01	196.43			20.89
	C2	403	1.5	0.01	202.58			18.50
		404	2.0	0.01	216.98			20.47
		405	3.0	0.01	208.56			13.88

Los resultados antes obtenidos de la velocidad de corrosión, el potencial de corrosión y la resistividad eléctrica, con el equipo de GCorr los podemos interpretar con las tablas que se encuentran en el manual de CYTED, las cuales se encuentran a continuación en las tablas IX. 1, IX. 2, y IX. 3, respectivamente.

Tabla IX.1. Interpretación de los resultados de la velocidad de corrosión [2].

I_{corr} (μA/cm²)	NIVEL DE CORROSIÓN
< 0.1	Despreciable
0.1 – 0.5	Moderado
0.5 – 1.0	Elevada
> 1.0	Muy elevada

Tabla IX. 2. Interpretación de los resultados del potencial de corrosión [2].

Pot (mV)	PROBABILIDAD DE CORROSIÓN
> -200	90% no suceda
-200 a -350	Incierta
< -350	90% que suceda

Tabla IX. 3. Interpretación de resultados de la resistividad eléctrica [2].

RESISTIVIDAD (KΩ-cm)	RIESGO DE CORROSIÓN
p > 200	Poco riesgo
200 > p > 10	Riesgo moderado
p < 10	Alto riesgo

En base a los resultados que el “Gcorr 8” ha arrojado a lo largo de este tiempo podemos observar que no ha cambiando mucho desde el inicio del proyecto hasta hoy día, ya que la velocidad de corrosión se mantiene en un nivel despreciable, porque los resultados se encuentran por debajo del valor de $0.10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, esto según las tablas del manual de DURAR, las cuales se encuentran anteriormente.

También podemos ver que en base al potencial (mV) y a la resistividad (KΩ-cm), estos valores no han cambiado gran cosa, y lo referente al potencial, que nos determina la probabilidad de que ocurra la corrosión se encuentran entre la incertidumbre y en el 90 % de que no pueda ocurrir; no así ocurre con la resistividad ya que los valores arrojados están casi en su mayoría por debajo de 10, lo cual nos indica según la tabla que hay un alto riesgo de que pueda haber corrosión en un futuro.

En algunos casos la resistividad ha arrojado valores arriba de 10, pero esto ocurre en muy pocos casos, si se toman en cuenta estos valores, aun así diremos que el riesgo de corrosión es moderado, habiendo en tal caso aun posibilidad de que esto ocurra.

X. CONCLUSIONES

En base a las pruebas desarrolladas durante este tiempo y a los resultados que se obtuvieron, podemos concluir lo siguiente:

- En lo que respecta a la velocidad de corrosión la cual mide el nivel de corrosión, los valores que se han encontrado durante el periodo de pruebas, se encuentra en una zona despreciable a moderada, pero esta última se presentó muy en solo una probeta la cual es la viga 3 "V-397-402-065-05-01" que corresponde al concreto con una relación agua/cemento de 0.65, y a su vez podemos decir que solo se presentó en una varilla, por tanto se puede decir que la velocidad de corrosión es despreciable, y que la varilla hasta hoy día se encuentra en buenas condiciones en lo que respecta a la corrosión.
- El potencial de corrosión que mide la probabilidad de que ocurra la corrosión se encuentra en un 90% de que no suceda, según las tablas de comparación ya descritas, ya que los valores oscilan por arriba de los -200 mV, pero si lo comparamos con la resistividad eléctrica la cual nos arroja el riesgo de que pueda ocurrir la corrosión, nos dice que hay un alto riesgo ya que los valores se encuentran por debajo de 10, en su mayoría, por tanto podemos decir que la corrosión se encuentra latente, aunque por el momento se encuentre libre y con poca probabilidad de que el acero se corra.
- Del lado de carbonatación, se concluye que esta va cada día en aumento, y que las probetas con relación agua/cemento de 0.65, son las más perjudicadas, y esto es lógico ya que estas probetas tienen mayor número de poros en el concreto, por el bajo contenido de finos que en ellas existen.

- La recomendación que se da para que un concreto sea más durable y una mejor vida útil, es la de producir concretos con baja relación agua/cemento, ya que esto nos asegura que tendrá menor número de poros y un mejor reacomodo entre sus partículas, por contener más finos, gracias a que estos ocupan los vacíos que dejan los agregados gruesos, así mismo como se encuentran menos vacíos la carbonatación que llega desde el exterior es menor.
- La vida útil que se le puede ofrecer a una obra con menor relación agua/cemento, es mayor que la de una grande, ya que se puede ver que la carbonatación tardará en llegar a esta última en muy pocos años ya que de los cuatro que lleva expuestas las probetas a la intemperie, casi llega a la primera varilla es decir a la que se encuentra a 1.50 cm de profundidad. Por tanto se puede decir que a una relación agua/cemento alta la carbonatación tardará aproximadamente unos 5 años en comenzar a corroer la varilla, contrario a la baja, ya que esta solo ha penetrado aproximadamente 5 mm en este tiempo, por tanto se puede decir que tardará otros 10 años en llegar a la primera varilla (1.5 cm de recubrimiento), si se comporta en forma lineal la penetración, pero puede ocurrir que esta avance con una menor velocidad.
- Así mismo se recomienda que los recubrimientos del acero embebido en el concreto sean aproximadamente de 2.00 cm, ya que esto garantizará que la vida útil de la obra sea mayor, pero no solo se recomienda esto, si no también que la elaboración y colado del concreto sean buenas, ya que muchas veces el concreto puede ser de buenas condiciones, pero el colado y la supervisión son deficientes, y esto ocasiona que haya apalamientos en el concreto, con eso se sugiere a la vez que la persona encargada de la supervisión tenga buenos principios y haga las cosas desde un principio bien.

BIBLIOGRAFÍA

1. <http://www.ficem.org/site/estadisticas.htm>
2. Tronconis, de Rincón Oladys, Romero, de Carruyo Aleida, Andrade, Carmen, Helene, Paulo. Et al, “Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado”. CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Tercera Edición. Agosto de 2000, pp 18 – 60, 101 – 106.
3. Brito, E. “Durabilidad de Estructuras Existentes de Concreto Reforzado, Obtención de su Metodología de Evaluación, y Anteproyecto de la Normativa, Correspondiente Para la Secretaría de Comunicaciones y Transportes SCT”, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, 2007, p.p. 111.
4. <http://www.ciencia-hoy.retina.ar/ln/hoy82/hormigon.htm>, Volumen 14, No. 82, Marcela Vázquez, Raúl Fernández, “La Corrosión Ataca Desde Adentro”, Mar de Plata, Agosto – Septiembre 2004.
5. Helene P., Pereira F., “Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón, Reparación, Refuerzo y Protección”, Proyecto de Difusión Tecnológica, CYTED, Argentina 2003.
6. Secretaría de Comunicaciones y Transporte, Instituto Mexicano del Transporte, del Valle Moreno, Pérez López, Martínez Madrid, “El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado”, Publicación Técnica No. 182, Querétaro, México 2001.
7. Secretaría de Comunicaciones y Transporte, Instituto Mexicano del Transporte, “Memorias del Segundo Curso Internacional Sobre Corrosión en Puentes y Estructuras Concreto – Metal”, Sanfandila, Qro. 1999.

8. <http://es.wikipedia.org/wiki/Cemento>
9. García Rivero J., Manual Técnico de Construcción, Holcim Apasco, 3ª edición, ISBN – 968 – 7680 – 26 – 1, año 2006, México, D. F., pp 75 – 81.
10. Concretos Mexicanos (CEMEX), “TECNOLOGÍA DEL CONCRETO”, 2000, pp 23-29.
11. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Norma Mexicana NMX – C – 414 – ONNCCE – 2004, México, Julio 2004.
12. H. F. W. Taylor, Department of Chemistry University of Aberdeen, “The Chemistry of Cements”, Vol. I, London and New York 1964, pp 1 – 23.
13. Martínez L., ACERO, La Ciencia Para Todos, 3ª Edición, ISBN 968-16-6509-0, México 2002, pp. 20-67.
14. <http://www.infoacero.cl/acero/historia.htmf>
15. http://www.infoacero.cl/acero/que_es.htm
16. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, del Valle Moreno, Martínez Madrid, Zea Gonzáles, “Memorias del Tercer Curso Internacional Sobre Corrosión en Puentes y Estructuras Concreto – Metal”, Sanfandila, Qro. 2001.
17. E I Moreno, A Torres-Acosta, J Pérez-Quiroz, F Almeraya-Calderón, C Gaona-Tiburcio, T Pérez-López, M Sosa-Baz, E Alonso-Guzmán, W Martínez-Molina, J.C. Rubio-Avalos, L Ariza-Águila, B Valdez-Salas, O Troconis-Rincón, “How enviromental pollution and methereological parameters affect concrete

infraestructura durability: DURACON México project (two years monitoring results)", Proyecto DURACON Coordinación Mexicana. Afiliación Permanente: Universidad de Queretaro A.C., Queretaro. México.

GLOSARIO

Desorción. f. Separación de un gas o un líquido volátil de una mezcla por evaporación.

Fenolftaleína. La fenolftaleína es un indicador de pH que en soluciones ácidas permanece incoloro, pero en presencia de bases se torna rosa o violeta. Es un sólido blanco, inodoro que se forma principalmente por reacción del fenol, anhídrido ftálico y ácido sulfúrico (H₂SO₄); sus cristales son incoloros. Tiene un punto de fusión de 254°C. Su fórmula es C₂₀H₁₄O₄.

Pasivación. La pasivación se refiere a la formación de una película relativamente inerte, sobre la superficie de un material (frecuentemente un metal), que lo enmascara en contra de la acción de agentes externos. Aunque la reacción entre el metal y el agente externo sea termodinámicamente factible a nivel macroscópico, la capa o película pasivante no permite que éstos puedan interactuar, de tal manera que la reacción química o electroquímica se ve reducida o completamente impedida.

Reacción Eutectoide. Una Reacción eutectoide es un proceso metalúrgico que ocurre durante el enfriamiento de aleaciones con determinada concentración de los aleantes. Todas las fases involucradas en este proceso son sólidas: durante el enfriamiento, una fase se transforma en otras dos, por difusión en estado sólido. Esto se materializa en la diferente estructura que adoptan los átomos, agrupándose en zonas en las cuales los aleantes están claramente diferenciados, como por franjas, aunque no se aprecia sino al microscopio. A la aleación obtenida, se la denomina aleación eutectoide.

Solvatación. f. Fís. y Quím. Fenómeno donde los iones o moléculas de un soluto se hallan circundados de un modo estable por moléculas de disolvente.

Soluto. m. Fís. En una solución, el cuerpo disuelto. Se llama soluto su abreviatura (Sl) a la sustancia minoritaria (aunque existen excepciones) en una disolución o, en general, a la sustancia de interés. Lo más habitual es que se trate de un sólido que es contenido en una solución líquida (sin que se forme una segunda fase)