



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

**ANÁLISIS DE LA CORROSIÓN POTENCIAL EN CONCRETOS REFORZADOS SOMETIDOS
A DIVERSOS AMBIENTES CORROSIVOS.**

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

PRESENTA:
GILBERTO MOCTEZUMA ACEVEDO

TUTOR PRINCIPAL
M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. JUNIO 2016.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Candelas Ramírez Luis
Secretario: Dr. Aire Untiveros Carlos Máximo
1^{er}. Vocal: M.I. Mendoza Escobedo Carlos Javier
2^{do}. Vocal: M. I. Carlos Narcia Morales
3^{er}. Vocal: Ing. Cottier Caviedes Juan Luis

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

AGRADECIMIENTOS

A Dios por todas las oportunidades en mi vida, que mi desempeño profesional sea por ti y para mayor gloria tuya Señor.

A mi tutor, M. en I. Carlos Javier Mendoza Escobedo, por su apoyo y paciencia en la realización de este estudio.

A la Dra. Tatiana Lilia Avalos Rendon, por su apoyo en la elaboración de las pruebas de difracción de rayos X y la prueba de espectroscopia de dispersión de energía (EDS).

A mis padres, por su amor que en mí vive, por sus enseñanzas y su predicación con el ejemplo.

A mis hermanos, por su paciencia y comprensión.

A mis amigos del instituto de ingeniería, que sin su apoyo este trabajo sería difícil de realizar.

A la universidad Nacional Autónoma de México, mi Alma Mater, el orgullo de mi vida, por la formación que recibí siempre te estaré en deuda, gracias UNAM.

ÍNDICE	Página
1.- INTRODUCCIÓN	4
1.2.-Antecedentes	5
1.3.- Alcance	7
2.- ESTADO DEL ARTE	8
2.1.- Mecanismos de corrosión	8
2.1.1.- Introducción	8
2.1.2.- Corrosión en el acero	10
2.2.- Corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto	11
2.2.1.- La Naturaleza de la capa pasiva en el concreto reforzado	12
2.2.2.- La cinética de la corrosión	13
2.2.3.- La corrosión activa	14
2.3.- La corrosión inicial por cloruros	14
2.4.- Pruebas no destructivas para evaluar la calidad del concreto endurecido	17
2.4.1.-Potencial de corrosión	18
2.4.2.- Intensidad de corriente de corrosión	18
2.4.3.- Velocidad de corrosión	19
2.4.4.- Resistividad eléctrica del concreto	20
2.5.- Pruebas complementarias	21
2.5.1.- Prueba de resistencia a la penetración de fluidos (ión cloruro)	21
2.5.2.- Difracción de rayos X	21
2.5.2.1- Clasificación del estado sólido	22
2.5.2.2.- Estructura cristalina ordenada	22
2.5.2.3.- Método de polvos	24
2.5.2.4.- Metodología	25

2.5.3.- Espectroscopia de dispersión de energía (EDS)	25
2.6.- Pruebas en estado fresco.	26
2.6.1.- Revenimiento	26
2.6.2.- Contenido de aire	26
2.6.3.- Peso volumétrico del concreto fresco	26
2.7.- Pruebas mecánicas	27
2.7.1.- Prueba de resistencia mecánica a compresión simple	27
2.7.2.- Prueba del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson del concreto a compresión	27
3.- DESARROLLO EXPERIMENTAL	28
3.1.- Materiales	29
3.1.1.- Cemento	29
3.1.2.- Agua para mezclado	29
3.1.3.- Agregados	29
3.1.4.- Humo de sílice	30
3.2.- Diseño de las mezclas de concreto	30
3.3 Pruebas de laboratorio	32
3.4 Soluciones para monitorear la corrosión	32
4.- RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	33
4.1.- Resultados en estado fresco	33
4.2.- Resultados de las pruebas electroquímicas	34
4.3.- Resultado de las pruebas complementarias	70
4.3.1.- Prueba de resistencia a la penetración de fluidos (ión cloruro)	70
4.3.2.- Prueba de difracción de rayos X	72
4.3.3.- Espectroscopia de dispersión de energía (EDS)	73

4.4.- Resultados de las pruebas mecánicas	74
4.4.1.- Resistencia a compresión	74
4.4.2.- Módulo de elasticidad y relación de Poisson	75
5.- CONCLUSIONES	77
6.- Referencias	79
7.- Anexos	82

1.- INTRODUCCIÓN

El concreto es el producto industrial más usado en la construcción debido a su versatilidad, costo y aceptación. Es también el más consumido a nivel mundial después del agua, produciéndose en total más de siete mil millones de toneladas por año.

La durabilidad de la infraestructura construida en los diversos países y particularmente la elaborada con concreto reforzado expuestas a condiciones agresivas, es uno de los grandes retos que se enfrentan mundialmente. En los litorales marinos tropicales y/o zonas lacustres, en condiciones de alta humedad y altas temperaturas se suele favorecer notablemente los procesos de corrosión, proporcionados también por el uso de las sales de deshielo. La corrosión del acero de refuerzo es la responsable fundamental de falla por delaminación y deterioro de las estructuras.

La corrosión del acero en el concreto está presente en diversas estructuras, numerosos reportes muestran este problema en puentes, muelles, estacionamientos y en general, toda la infraestructura expuesta a iones agresivos como el cloruro (Cl⁻).

En México como país, el costo por daños de corrosión son desconocidos, pero se presume que están entre el 2% y el 4% del PIB, ya que, por ejemplo, los daños en países industrializados como Inglaterra, han sido cuantificados y oscilan entre estos valores¹, a pesar de que estos países tienen un buen nivel de mantenimiento en su infraestructura, mucho mayor al que se le da en México.

Básicamente, la corrosión del acero en el concreto es un proceso electroquímico y los iones cloruro son considerados el ingrediente más importante causante de esto. La velocidad de corrosión del acero embebido en el concreto está fuertemente influenciada por los parámetros ambientales. Para que la reacción electroquímica ocurra, es necesario que el oxígeno y la humedad estén presentes. Además, parámetros inherentes del concreto como la resistividad, la alcalinidad, la difusión y la permeabilidad, juegan un papel importante en el comportamiento de la corrosión del acero de refuerzo.

Las primeras observaciones de corrosión del acero embebido en el concreto fueron hechas a principios del siglo pasado, sin embargo, sólo a mediados del mismo se inició el estudio sistemático de este problema que ha llegado a ocupar un lugar muy importante dentro de las investigaciones sobre corrosión a nivel mundial, por los problemas y tipos de estructuras involucrados.

1.2.-Antecedentes

La corrosión de los metales, especialmente la del acero de refuerzo en el concreto, ha recibido una atención creciente en los últimos años debido a su presencia generalizada en ciertos tipos de estructuras y el alto costo de la reparación de las mismas. La corrosión en el acero de refuerzo se observó por primera vez en estructuras marinas y en las plantas de fabricación de productos químicos.²⁻⁴ Recientemente, numerosos informes muestran su ocurrencia en tableros de puentes, estructuras de estacionamiento, y otras estructuras expuestas a los iones cloruro, que de hecho es el principal agente agresivo.

La investigación se ha incrementado ampliamente sobre los factores que contribuyen a la corrosión del acero, esto mejora nuestra comprensión de los mecanismos de corrosión, especialmente en relación con el papel de los iones cloruro. Se prevé que la aplicación de los resultados se traducirá en menos casos de corrosión en las nuevas estructuras de concreto reforzado y métodos mejorados de reparación de los daños de la corrosión en las estructuras existentes.

El concreto normalmente proporciona al acero de refuerzo una excelente protección contra la corrosión. El ambiente de alta alcalinidad en el concreto crea una película fuertemente adherida que apacigua la corrosión del acero y lo protege.

Sin embargo, la corrosión del acero puede ocurrir si, el concreto no resiste la penetración de las sustancias que causan la corrosión, la estructura no fue diseñada correctamente para el entorno de servicio, el medio ambiente no fue anticipado o se presentan cambios durante la vida de servicio de la estructura.

La exposición de concreto reforzado a los iones cloruro es la principal causa de la corrosión prematura del acero de refuerzo.⁵ Sin embargo, la corrosión puede ocurrir en algunas circunstancias en ausencia de iones de cloruro. Por ejemplo, la carbonatación del concreto

reduce su alcalinidad, permitiendo con ello la corrosión del acero. La carbonatación es por lo general un proceso lento en concretos con baja relación agua/cemento (a/c), y esta corrosión por carbonatación no es tan común como la corrosión inducida por iones cloruro.

Los iones cloruro son comunes en la naturaleza y muy pequeñas cantidades son normales en materiales para hacer concreto. Los iones cloruro también se pueden añadir intencionadamente en el concreto, más a menudo como constituyente de aditivos acelerantes de fraguado. Los iones cloruro disueltos también pueden penetrar en el concreto endurecido en las estructuras expuestas a ambientes marinos, lagos secos, a sales de deshielo y en condiciones donde exista el contacto del concreto con sustancias que contengan cantidades considerables de cloruros.

La velocidad de corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto está influenciada por factores ambientales. El oxígeno y la humedad deben estar presente si la corrosión producida es electroquímica.

Otros factores que afectan la velocidad y nivel de corrosión son la heterogeneidad en el concreto y el acero de refuerzo, el pH del agua en los poros del concreto, la carbonatación de la pasta de cemento Portland, grietas en el concreto, corrientes parásitas y galvánicas, efectos debidos al contacto entre metales diferentes. Las características de diseño y prácticas de construcción también desempeñan un papel importante en la corrosión del acero. Las proporciones de la mezcla del concreto, espesor del recubrimiento del acero de refuerzo, las medidas de control de la fisuración, y la aplicación de medidas destinadas específicamente para la protección contra la corrosión, son algunos de los factores que ayudan a controlar el inicio y la velocidad de la corrosión.

El deterioro del concreto reforzado es debido a la corrosión del acero de refuerzo, pues los productos sólidos de la corrosión ocupan un volumen mayor que el del acero original y ejercen tensiones expansivas sustanciales sobre el concreto circundante. Las manifestaciones externas de la corrosión incluyen manchas, agrietamiento, y el desconchado del concreto. Al mismo tiempo, se reduce el área de la sección transversal del acero de refuerzo. Con el tiempo, el agotamiento estructural puede ocurrir ya sea debido a la pérdida de adherencia entre el acero de refuerzo y el concreto debido al agrietamiento y desprendimiento, o como resultado de la reducción de la sección transversal del acero. Este último efecto, puede ser de especial preocupación en estructuras que contienen acero pretensado de alta resistencia en que una pequeña cantidad de pérdida de metal podría inducir la falla.

La investigación sobre la corrosión no ha producido un acero al carbono u otro tipo de refuerzo que no se corroa cuando se utiliza en el concreto y que sea a la vez económico y técnicamente viable. Además, la práctica y la investigación indican la necesidad de la calidad, un diseño cuidadoso del concreto, las buenas prácticas de construcción y límites razonables en la cantidad de cloruros en los ingredientes de la mezcla de concreto. Las medidas que se

están utilizando e investigado incluyen el uso de inhibidores de la corrosión, revestimientos de protección sobre el acero de refuerzo, y la protección catódica. En general, cada una de estas medidas han tenido éxito, resolviendo problemas de corrosión del acero de refuerzo embebido y la de otros metales, sin embargo, no se ha eliminado.

1.3.- Alcance

En este trabajo, se analiza la corrosión del acero de refuerzo, que puede presentarse en concretos con diferentes relaciones agua/cemento (a/c) y el efecto que se puede tener con el uso de humo de sílice como cementante suplementario; el concreto reforzado se sometió a diferentes ambientes corrosivos durante un tiempo considerable, para detectar los cambios en el estado corrosivo del sistema acero-concreto.

En el análisis se tiene dos grupos de mezclas; las primeras, sin cloruros añadidos a la mezcla, forman el grupo uno y el grupo dos será del mismo diseño de mezclas del grupo uno pero a las que se le adiciona el 1% de cloruros respecto al peso del cemento o cementante, replicando las mezclas del grupo uno pero contaminadas; serán cuatro mezclas de cada grupo; para el grupo uno, la primera mezcla será con una relación agua/cemento $a/c = 0.4$, la segunda mezcla será de una relación agua/cemento a/c o agua/ material cementante = 0.4 con una adición de humo de sílice del 5% del peso del cemento, la tercera mezcla será con una relación agua/cemento $a/c=0.5$ y la mezcla cuatro será con una relación agua/cemento $a/c= 0.6$; como se mencionó antes el grupo dos está formado por las mismas mezclas del grupo uno pero con la adición del 1 % de cloruros del peso del cemento o cementante; por lo tanto se tiene ocho mezclas que se analizarán en este estudio.

El 1% de cloruros del peso del cemento o cementante se debe a que es el umbral que marca la norma ACI 318-11⁶ para el contenido de cloruros en una mezcla, a partir del cual se propicia la corrosión del refuerzo.

Los ambientes corrosivos que se estudian tienen el propósito de considerar las condiciones de lugares que presentan contenidos altos de cloruros, como lo son la cantidad de cloruros en el agua de mar que es de alrededor de 15,000 ppm, en lagos secos en los que se han registrado valores de 45,000 ppm de cloruros y como ejemplo de un lugar de bajo contenido en cloruros, un ambiente con el contenido de cloruros de 5,000 ppm. Después de 28 días de curado, se sumergen tres especímenes de cada mezcla en las tres soluciones salinas con las diferentes concentraciones antes mencionadas.

Este análisis se limita al estudio de la actividad corrosiva en estas mezclas, dando especial atención a los tiempos de inicio de la actividad corrosiva y otras condiciones de deterioro en los especímenes de concretos al estar en contacto con los ambientes corrosivos ya mencionados.

2.- ESTADO DEL ARTE

2.1.- Mecanismos de corrosión

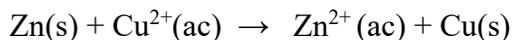
2.1.1.- Introducción

La terminología de la ASTM G 193-12⁷ define a la corrosión como “la reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal y su medio ambiente, que produce un deterioro del material y de sus propiedades”.

Siempre que la corrosión esté originada por reacción química, la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura y de la concentración de los reactivos. Otros factores, como el esfuerzo mecánico y la erosión también, pueden contribuir al deterioro. La mayor parte de la corrosión de los materiales concierne al ataque químico de los metales, la cual ocurre principalmente por ataque electroquímico, ya que los metales tienen electrones libres que son capaces de establecer pilas electroquímicas dentro de los mismos. Las reacciones electroquímicas exigen un electrolito conductor, cuyo soporte es habitualmente el agua. De aquí que en ocasiones se le denomine "corrosión acuosa". Muchos metales sufren corrosión en mayor o menor grado por el agua y la atmósfera. Los metales también pueden ser corroídos por ataque químico directo procedente de soluciones químicas. El ataque electroquímico en el acero del concreto reforzado es el que se analiza en esta investigación de manera puntual.

Otro tipo de degradación de los metales que sucede por reacción química con el medio es lo que se conoce como "corrosión seca" que origina en ocasiones una degradación importante de los metales, especialmente cuando va acompañada de altas temperaturas.

Para ejemplificar de manera más sencilla el fenómeno de la corrosión por ataque electroquímico se analiza la siguiente reacción química:



Considérese una barra de Zinc, Figura 1, introducida en una disolución de sulfato de cobre, en la disolución se tiene el catión Cu^{2+} , éste dará un color azul a la disolución. Al paso del tiempo se puede observar que la barra de Zinc se cubrirá de una capa de color rojizo mientras que el color azul de la disolución irá desapareciendo. Estos cambios se interpretan así: en primer lugar el Zn por disolución pasa a Zn^{2+} , mientras que el Cu^{2+} pasa a Cu, cobre metálico.

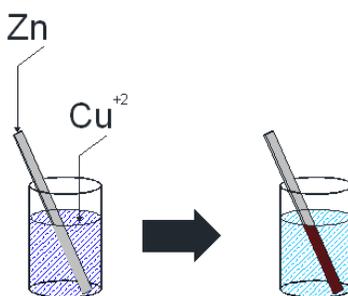
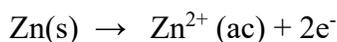


Figura 1. Proceso de corrosión en una barra de Zinc por una disolución de sulfato de cobre.

Esas dos semireacciones se pueden considerar por separado y observar entonces que el Zinc sería el reductor, se oxida a Zn^{2+} , pierde electrones y aumenta su índice de oxidación de 0 a +2.

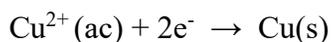
Oxidación: pérdida de electrones



Reductor: se oxida. Aumenta su índice de oxidación (0 \rightarrow +2).

Por otra parte el Cu^{2+} , es el que experimenta la reducción y es por eso que es el oxidante y disminuye su índice de oxidación de +2 a 0.

Reducción: ganancia de electrones



Oxidante: se reduce. Disminuye su índice de oxidación (+2 \rightarrow 0).

Cuando ambos procesos se dan de manera separada es cuando se tiene el sistema conocido como pila galvánica, Figura 2. En este caso se tendría el ánodo donde se produce la oxidación y el cátodo donde se produce la reducción, ambas disoluciones estarían unidas con un puente salino para asegurar la conducción eléctrica y de la placa de Zinc a la de cobre habría un flujo de electrones que se podría registrar con un galvanómetro o algún otro medidor de corriente eléctrica.

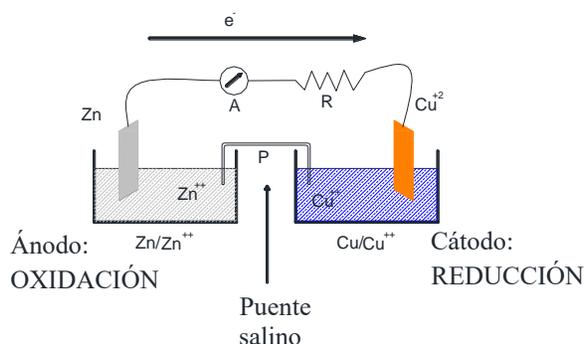
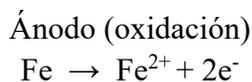


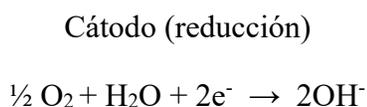
Figura 2. Funcionamiento de la pila galvánica.

2.1.2.- Corrosión en el acero

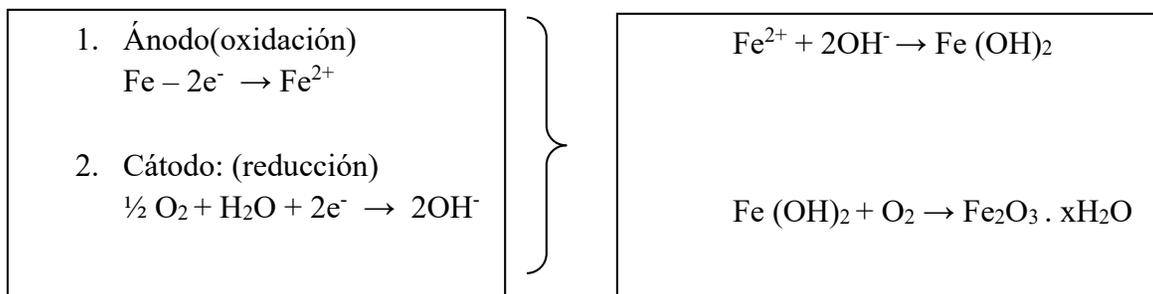
Ese mismo proceso de la pila galvánica es el que existe en la superficie del acero cuando se produce la corrosión. En el caso del acero se tendría como reacción anódica, la reacción de oxidación, el paso del Fe a Fe²⁺.



Por otra parte en un medio acuoso con oxígeno disuelto, la reacción que tiene lugar es la reducción del oxígeno molecular a iones hidróxido.



Posteriormente esos iones hidróxido pueden reaccionar con el Fe²⁺ para formar un hidróxido de hierro y por sucesivas y muy complejas oxidaciones dan lugar a distintos óxidos hidratados



que difieren en color y aspecto, que es lo que normalmente llamamos corrosión (oxidación).

En el caso, por ejemplo, de una gota de agua sobre la superficie de acero, Figura 3, se puede observar cómo se forma una micropila galvánica. En los bordes de la gota de agua, donde la concentración del oxígeno molecular disuelto es mayor, se tendría el proceso de reducción, donde se van a producir los iones hidróxido, eso hace que al centro de la gota más pobre en oxígeno molecular, será la zona anódica, donde el Fe va a pasar a Fe^{2+} al reaccionar posteriormente con los iones hidróxido, para formar el hidróxido de hierro, que posteriormente dará lo que se llama corrosión (oxidación).

Todos los metales, excepto el oro y el platino, son termodinámicamente inestables en condiciones atmosféricas normales pues finalmente, vuelven a sus óxidos u otros compuestos. Por lo tanto, la información de importancia para el ingeniero que utilizará un metal no es si el metal se corroe, si no la rapidez con que la corrosión se producirá.

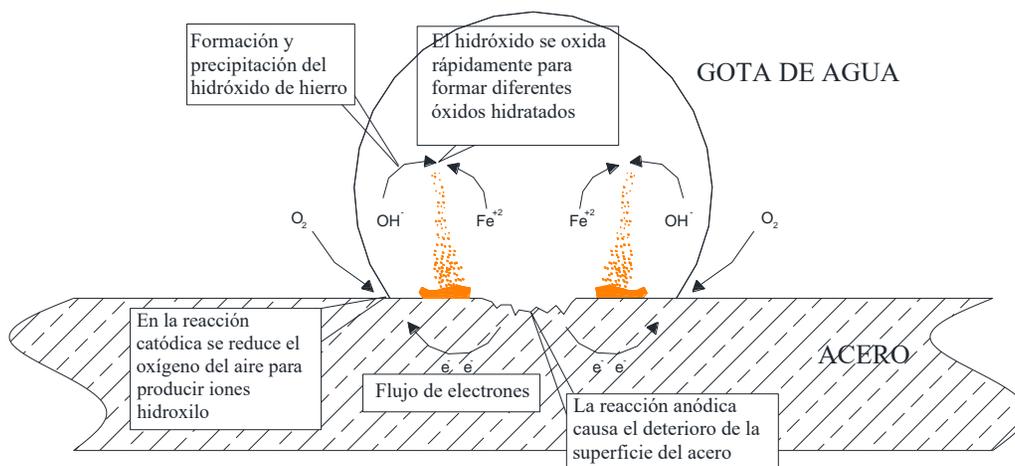
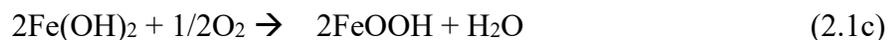


Figura 3. Formación de áreas anódicas y catódicas en la corrosión del acero.

2.2.- Corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto

La corrosión del acero en el concreto es un proceso electroquímico, es decir, se trata de la transferencia de carga (electrones) de una especie a otra. Para que una reacción electroquímica ocurra (en ausencia de una fuente eléctrica externa) debe haber dos reacciones de media celda, una capaz de producir electrones (la reacción anódica, la oxidación del hierro, $[Fe]$, para formar iones ferrosos) y otra capaz de consumir electrones (la reacción catódica, la reducción de oxígeno para formar iones hidroxilo, $[OH^-]$). Cuando las dos reacciones se producen en lugares muy distantes entre sí, son denominadas macroceldas; cuando ocurren juntos, o esencialmente en el mismo lugar, se denominan microceldas.

Para el acero embebido en el concreto, las reacciones de media celda anódica implican la oxidación o la disolución de hierro, es decir,



y las más probables reacciones de media celda catódica son



Cualquiera de estas reacciones anódica y catódica, ocurren en un caso específico que depende de la disponibilidad de oxígeno y del pH de la solución en los poros de la pasta de concreto en las proximidades del acero.

Para el concreto sano, el pH de la solución de poro oscila entre 12.5 y 13.5; dentro de las reacciones mostradas en la ecuación (2.1a) y (2.1b), son las reacciones anódicas más probables. En ausencia de cualquier otro factor, los óxidos de hierro, Fe_3O_4 y Fe_2O_3 o hidróxidos de estos compuestos, se forman fases sólidas y pueden desarrollarse como una capa protectora (capa pasiva) en el acero. Si se reduce el pH de la solución de poro, por ejemplo, por carbonatación o por una reacción puzolánica, el sistema puede ser desplazado a una condición en que estos óxidos no forman una capa protectora y es posible que haya corrosión activa. Teóricamente, la corrosión activa también podría ser inducida por la elevación del pH a un valor en el cual la reacción mostrada en la ecuación (2.1d) puede llevarse a cabo, para que HFeO_2^{-} sea producto de una reacción termodinámicamente estable. La reacción que se muestra en la ecuación (2.1c) también puede llevarse a cabo a un pH normal de concreto a temperaturas elevadas ($> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, se han reportado a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$)⁸. No hay ejemplos de esta reacción.

2.2.1.- La naturaleza de la capa pasiva en el concreto reforzado

La capa pasiva en el acero de refuerzo es muy difícil de estudiar debido a que se trata de una película muy delgada con espesores que varían entre 3 y 8 nm⁹ que no subsiste en presencia de aire para su análisis por que se descompone o deshidrata¹⁰, además, de que por el espesor muy fino muy pocas técnicas de análisis superficial son adecuadas para estudiarla.

En teoría el desarrollo de esta película protectora o capa pasiva se da debido a la alta alcalinidad de la solución contenida en los poros del concreto, ya que se interpreta que la

abundancia de iones hidroxilo es la que determina la formación y estabilidad de esta capa protectora.

Una película pasiva no detiene en realidad la corrosión, sino que reduce la velocidad de corrosión a un nivel insignificante. Para el acero en el concreto, la velocidad de corrosión pasiva es típicamente $0,3 \mu\text{m/año}^{11}$; sin la película pasiva, el acero se corroe a tasas de al menos tres órdenes de magnitud más alto que esta.

2.2.2.- La cinética de la corrosión

Todos los metales son termodinámicamente inestables en condiciones atmosféricas normales y, finalmente, volverán a sus óxidos u otros compuestos. La velocidad de corrosión se puede determinar como la corriente de corrosión mediante la medición de la velocidad a la que se retiran los electrones del hierro en las reacciones anódicas que se han descrito previamente.

La corriente de corrosión se puede convertir en una tasa de pérdida de metal de la superficie del acero por la ley de Faraday:

$$M = \frac{ItA_w}{nF}$$

donde,

M = masa de metal disuelto o se convierte en óxido, g;

I = corriente, A;

t = tiempo, s;

A_w = peso atómico;

n = valencia;

F = Constante de Faraday (96.500 culombios/equivalente en masa).

Al dividir por la densidad, la masa se puede convertir en el espesor de la capa disuelta u oxidada, y para el hierro (acero): $1 \mu\text{A/cm}^2 = 11,8 \mu\text{m/año}$. La densidad de corriente es equivalente a la corriente neta dividida por el área del electrodo, sin embargo, no se puede determinar directamente. Esto es debido a la exigencia de un equilibrio de carga, lo que significa que las tasas de producción y consumo de electrones por la reacción anódica y catódica de media celda, respectivamente, son siempre iguales y, por lo tanto, ninguna corriente neta se puede medir. En consecuencia, para determinar la corriente de corrosión, el sistema debe ser desplazado del equilibrio mediante la aplicación de un potencial externo y la medición de la corriente neta resultante (mediciones potencioestáticas).*

* El potencial electroquímico es una medida de la facilidad de transferencia de carga de electrones entre un metal y su entorno, en este caso, entre el acero y el cemento pegado en una solución de poro. Es una propiedad de la interfaz del sistema acero-concreto y no de acero en sí. No es posible determinar el valor absoluto del potencial y, por lo tanto, es necesario para medir la diferencia de potencial entre la superficie de acero y un electrodo de referencia. Esto podría ser un electrodo estándar de hidrógeno (SHE), un electrodo saturado de calomelanos (SCE), o un electrodo de Cu/CuSO₄ (CSE).

En ausencia de la pasividad, la corriente neta aumentaría con la polarización anódica, como se muestra por la parte superior de la curva de la Figura 4, y la polarización catódica se traduciría en la curva inferior. Tafel¹² ha demostrado que para valores de η en el rango de ± 100 y 200 mV, η es directamente proporcional al logaritmo de la densidad de corriente

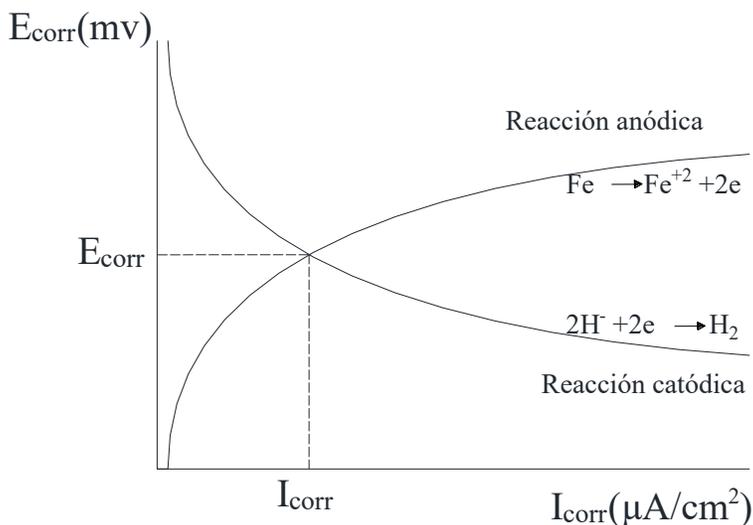
$$\eta = a + b \log(i)$$

donde

a = constante; y

b = pendiente de Tafel

Un valor de la corrosión de la densidad de corriente (I_{corr}), puede obtenerse extrapolando la parte lineal de las curvas del potencial (E_{corr}), como se muestra por las líneas discontinuas en la Figura 4.



La Figura 4. Esquema de la curva de polarización para un sistema de corrosión activo sin ningún tipo de limitaciones de difusión.

2.2.3.- La corrosión activa

La corrosión activa del acero en el concreto debe estar precedida por la ruptura de la película o capa pasiva. Esto puede ocurrir en toda la superficie del acero debido a un cambio general en las condiciones termodinámicas, o de forma local debido al ataque químico localizado o fallo mecánico. El primero suele ser el resultado de una disminución en el pH al nivel en el que la película pasiva ya no es estable. Este último es generalmente causada por el ataque agresivo de iones tales como cloruros, pero podría dar como resultado la aparición de grietas en el recubrimiento del concreto.

2.3.- La corrosión inicial por cloruros

La causa más común de la iniciación de la corrosión del acero en el concreto es la presencia de iones cloruro. La fuente de cloruros pueden ser aditivos, contaminantes, ambientes

marinos, zonas lacustres, sales industriales de salmuera o de deshielo. El mecanismo detallado real de ruptura de la película pasiva por cloruros no se conoce debido a las dificultades para examinar el proceso en una escala atómica en la capa pasiva extremadamente delgada. Se cree que en la película más gruesa o en el recubrimiento del acero, los iones de cloruro se incorporan a la película al localizarse en puntos débiles, creando defectos iónicos, que permiten un fácil transporte iónico.

En cualquier caso, el resultado neto es que la corrosión activa puede ocurrir en estos lugares y, una vez iniciada, se genera autocatalíticamente, es decir, a manera de auto-alimentación. Los iones cloruro y ferrosos reaccionan para formar un complejo soluble que se difunde lejos del sitio anódico. Cuando el complejo llega a una región de pH alto se descompone, precipitando un hidróxido de hierro insoluble y liberando el cloruro para eliminar más hierro de la barra de acero de refuerzo. Por otra parte, debido a que la región de ruptura local de la capa pasiva se convierte en anódica, más iones cloruro son atraídos a esa área del acero que a las áreas circundantes y a la catódica, de modo que la concentración local de iones cloruro aumenta.

De esta manera, se forma una celda de corrosión con una zona catódica en la cual se da el proceso de reducción y un área anódica pequeña, la picadura, donde se disuelve el acero.

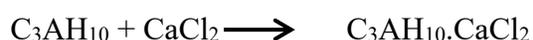
El ión cloruro Cl^- penetra en el concreto a través de la red de poros. Estos iones se disuelven en el agua que contienen los poros y avanzan hacia el interior por difusión u otros mecanismos de transporte. Sin embargo, los iones cloruro disueltos en los poros pueden interactuar con las fases sólidas del concreto quedando inmovilizados, por lo tanto, el cloruro dentro del concreto puede encontrarse en varios estados:

Cloruro libre: es el que permanece disuelto en el agua que contienen los poros. Se desplaza por el interior del concreto mediante difusión u otros mecanismos.

Cloruro ligado: es el que permanece unido a las fases sólidas del concreto. Este cloruro queda inmovilizado, sin posibilidad de moverse hacia el interior del concreto.

Cloruro total: es la cantidad total de cloruro que contiene el concreto, sin hacer distinción entre cloruro libre y ligado. La concentración de cloruro total en el concreto es igual a la suma de concentraciones de cloruro libre y ligado.

Los procesos mediante los cuales se unen los cloruros a las fases sólidas¹³ son tanto de tipo químico como de tipo físico. El principal responsable de la unión química de los cloruros es el aluminato tricálcico, este componente del cemento reacciona con los cloruros de los poros, para formar el monocloroaluminato hidratado $\text{C}_3\text{AH}_{10} \cdot \text{CaCl}_2$ y el tricloroaluminato hidratado $\text{C}_3\text{AH}_3 \cdot 3\text{CaCl}_2$ según las reacciones:





La unión física de los cloruros a las fases sólidas del concreto se produce mediante el fenómeno conocido como adsorción. Los cloruros disueltos en el agua de los poros se unen a la superficie de las partículas sólidas del concreto. El principal sólido responsable de la adsorción es el gel silicato cálcico hidratado (CHS), que, durante la hidratación del concreto, se precipita en forma coloidal en un área superficial muy grande. Sobre esta gran superficie se adsorben los cloruros.

El cloruro libre es el más peligroso ya que al quedar disuelto en el agua de los poros, es capaz de romper la capa pasiva del acero de refuerzo e iniciar su corrosión, localizándose en determinados puntos del acero. También debe tenerse en cuenta que, aunque el cloruro ligado no puede inducir la corrosión, si puede ser liberado en determinadas circunstancias. Por ejemplo, la carbonatación del concreto produce la liberación del cloruro ligado, pasando a ser cloruro libre e incrementando el riesgo de corrosión. Por lo tanto, las normativas siempre se refieren al límite de cloruros totales. El proceso de corrosión en el acero del concreto reforzado se ejemplifica en la Figura 5.

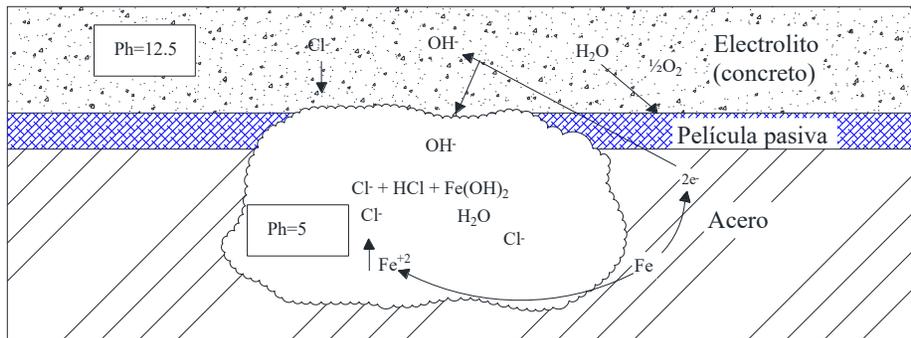
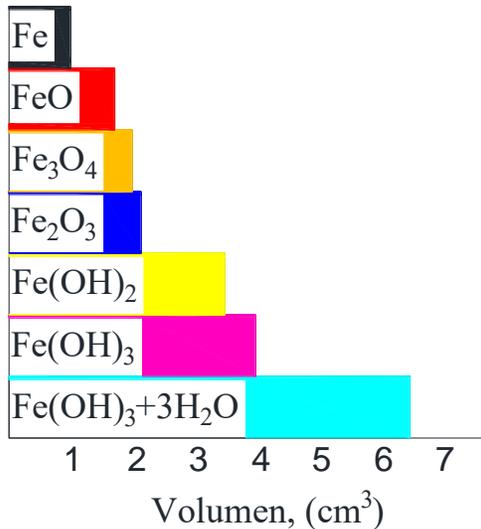


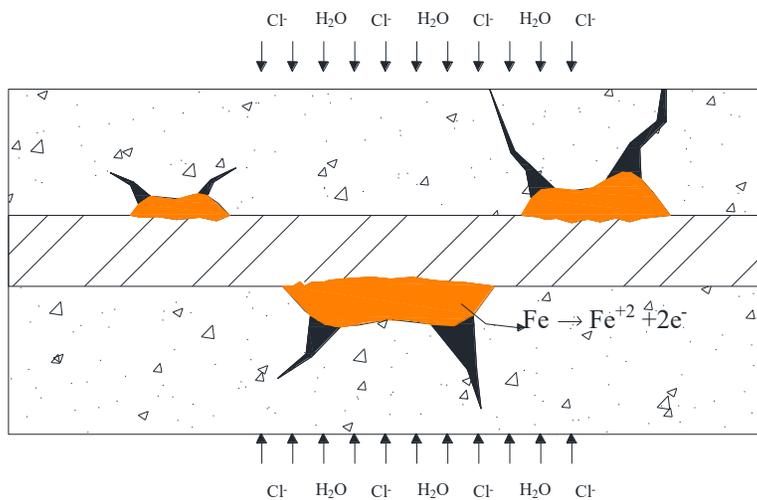
Figura 5. Esquema simplificado del proceso de corrosión del acero en presencia de cloruros, propuesto por el CEB(Comité europeo del concreto, por sus siglas en francés, 1990).

Un producto de la reacción de corrosión semisólida es de color verde claro que se encuentra a menudo cerca del acero que, al exponerse al aire, se vuelve negro y posteriormente color óxido. Los hidróxidos de hierro tienen un volumen específico mayor que el del acero del cual se formaron, tal como se indica en la Figura 6.¹⁴



La Figura 6. Los volúmenes relativos de hierro y su reacción producida.

En consecuencia, con los aumentos en el volumen de los productos reactivos, crea una tensión interna dentro del concreto, que puede ser suficiente para causar el agrietamiento y desprendimiento del recubrimiento de concreto, Figura 7. Un segundo factor en el proceso de corrosión que se suele pasar por alto debido al efecto más dramático de la exfoliación es el aumento de acidez en la región de los sitios anódicos que pueden conducir a la disolución local de la pasta de cemento.



La Figura 7. Representación esquemática del agrietamiento en el concreto reforzado.

No obstante de que el mecanismo de difusión es relativamente lento, los cloruros y en general todas las sales, pueden penetrar mucho más rápido por un mecanismo de succión capilar, muy propio de ambientes de niebla salina existente en climas cálidos marinos, en los que los cloruros están suspendidos en microgotas de humedad en el aire. En este fenómeno incide mucho la dirección predominante del viento y la insolación.

Todas las normativas limitan el contenido de cloruros en el concreto fresco, pero estos difieren de un país a otro. Esto es debido a la dificultad de establecer un límite seguro, por debajo del cual no exista riesgo de despasivación del acero en el concreto, ya que este límite depende de numerosas variables, algunas de las cuales son: el tipo de cemento (finura, contenido de yeso, contenido de aluminato tricalcico, etc.), relación a/c, contenido de humedad, etc.¹⁵

2.4.- Pruebas no destructivas para evaluar la calidad del concreto endurecido

Las técnicas experimentales que se utilizan para medir la corrosión en las estructuras de concreto reforzado son las pruebas electroquímicas, las cuales permiten conocer las características físicas y eléctricas del concreto reforzado en estado endurecido.

El uso de las pruebas electroquímicas se ha presentado como una opción para estudiar el estado del acero de refuerzo embebido en concreto mediante señales eléctricas y el análisis de la respuesta del sistema acero-concreto. La rapidez de medición y sensibilidad son algunas ventajas de estas técnicas, además de ser pruebas no destructivas. Las más utilizadas son: medición de potencial de corrosión (E_{corr}), resistencia de polarización (R_p), velocidad de corrosión (V_c), resistividad eléctrica (ρ), permeabilidad al ión cloruro, entre otras. Todas las pruebas electroquímicas aportan información que se complementa con apreciaciones visuales de deterioro físico (como cuarteaduras) y químicas (carbonatación y penetración de cloruros principalmente).

2.4.1.-Potencial de corrosión

El potencial de corrosión de media celda (E_{corr} en mV), puede medirse por comparación con una celda de referencia normalizada, la cual tiene un valor constante conocido, como un electrodo de Cu/CuSO₄ (CSE). Aunque la medida de un potencial electroquímico no aporta información cuantitativa sobre la velocidad de corrosión, ofrece indicaciones cualitativas que pueden complementarse con otros ensayos. El procedimiento para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto está contenido en la Norma ASTM-C-876¹⁶, la cual establece el método, criterios que relacionan al potencial de corrosión y su condición de corrosión, mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterio de evaluación de las mediciones de potenciales de media celda

Potencial de corrosión (E_{corr} en mV)	Condición
$E_{corr} > -200$	Menos del 10 % de probabilidad de corrosión
$-200 > E_{corr} > -350$	Corrosión incierta
$E_{corr} < -350$	Más del 90 % de probabilidad de corrosión

La prueba de potencial de media celda se realiza conectando una terminal de un medidor de voltaje de alta impedancia interna, al acero embebido en concreto y la otra terminal, a un electrodo de referencia. De esta forma se mide un potencial de media celda, como se ilustra en la Figura 8. En esta figura, se observa que el potencial de corrosión (E_{corr}) es puntual, por lo que debe registrarse con precisión el sitio de medición. La lectura que se toma es particular y no se excluye que, en las inmediaciones, el valor del potencial cambie bruscamente.

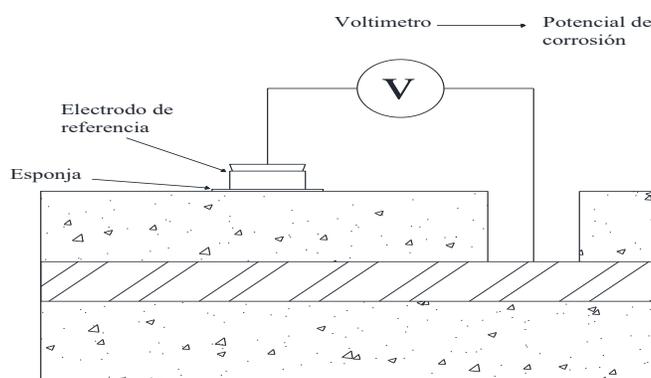


Figura 8. Medición del potencial de corrosión en el concreto reforzado.

2.4.2.- Intensidad de corriente de corrosión

La intensidad de corriente, es la corriente por unidad de área de un metal en un medio agresivo (corrosivo), y determinada mediante una técnica electroquímica y con el uso de un potencióstato/galvanostato; generalmente se reporta en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ o A/m^2 . Para estas pruebas se emplea la técnica de resistencia a la polarización (R_p) por el método de corriente confinada bajo la Norma ASTM-G-59-91¹⁷; se puede emplear en pruebas de campo sobre estructuras de concreto porque se confina el área en la que se mide la velocidad de corrosión. La resistencia a la polarización es la habilidad de un material a ceder o ganar electrones. Es la facilidad con la cual un metal tiende a sufrir o no corrosión.

La resistencia a la polarización es una técnica ampliamente utilizada por su rapidez y la ventaja de prácticamente no perturbar al sistema donde se hace la medición por estar muy cerca al potencial de corrosión E_{corr} . Con el valor obtenido se calcula la corriente de corrosión mediante la relación:

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p}$$

donde:

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

$B = 0.026$, constante que se obtiene de las pendientes de Tafel

R_p = Resistencia a la polarización de un metal en $\Omega\text{-cm}^2$

Para el caso de varillas de refuerzo en concreto se toma $B = 0.026$ V para el concreto reforzado y $B = 0.052$ V para concreto pretensado¹⁸⁻²¹.

2.4.3.- Velocidad de corrosión

Se llama velocidad de corrosión V_c (Corrosion Rate “CR”) a la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo. Las unidades básicas son g/cm^2 día; aunque la forma usual es definirla a partir de medidas de tipo electroquímico, transformando este dato a partir de la densidad del metal, en unidades de penetración en (mm/año o mils/año).

La velocidad de corrosión se puede obtener a partir de la intensidad de corriente de corrosión multiplicando ésta por un factor que es 11.8, según la recomendación del ACI 222R-01 Protection of metals in concrete against corrosion, o se puede calcular empleando las leyes de Faraday.

$$V_c = I_{corr} * 11.8 \left(\frac{\mu\text{m}}{\text{año}} \right)$$

El objetivo de esta prueba es determinar la velocidad a la cual el refuerzo pierde sección, por corrosión de la misma. La tabla 2 muestra la velocidad de corrosión en el acero de refuerzo del concreto reforzado en $\mu\text{m/año}$, relacionando el I_{corr} con el nivel de corrosión.

Tabla 2. Criterio de evaluación de la velocidad de corrosión

Velocidad de corrosión (V_c en $\mu\text{m/año}$)	Nivel de corrosión
<1.0	Muy baja
1.0 - 5.0	Baja
5.0-10.0	Moderada
10.0 - 100.0	Alta
>100.0	Muy alta

2.4.4.- Resistividad eléctrica del concreto

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad. Su unidad de medida es el $\text{k}\Omega\text{-cm}$ u $\Omega\text{-m}$. Depende en gran medida del grado de saturación de los poros del concreto, y en menor grado de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. La resistividad está en función de variables tales como el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación a/c, la porosidad del concreto, entre otras.

Debido a que la resistividad es uno de los factores que controlan la velocidad de corrosión del acero en el concreto, actualmente se ha incrementado el interés por determinar esta propiedad intrínseca del concreto; la técnica recomendada para realizar la medición de la resistividad está bajo el anteproyecto de norma ASTM WK37880²², los criterios se muestran

en la Tabla 3, según la recomendación del ACI 222R-01 Protection of metals in concrete against corrosion.

Tabla 3. Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica del concreto y su relación con la velocidad de corrosión del acero de refuerzo.

Resistividad del concreto (ρ) en $K\Omega.cm$	Velocidad de corrosión
$\rho > 20$	Baja
$20 > \rho > 10$	Moderada
$10 > \rho > 5$	Alta
$\rho < 5$	Muy alta

Una de las técnicas muy usada es la de cuatro puntas o de Wenner, planteada originalmente para realizar evaluaciones en suelos, sin embargo es utilizada también para medir la resistividad del concreto.

Consiste en cuatro contactos (electrodos) igualmente espaciados colocados en contacto con la superficie del concreto, una pequeña corriente es conducida entre los contactos externos y se mide la diferencia de potencial obtenida entre los electrodos internos. La resistividad se calcula mediante la siguiente ecuación y el montaje se puede observar en la Figura 9:

$$\rho = 2\pi a \left(\frac{V}{I} \right)$$

donde:

ρ = resistividad eléctrica, en $K\Omega.cm$

a = separación de los electrodos, en cm

V = potencial entre los electrodos internos, en V

I = corriente aplicada, en A

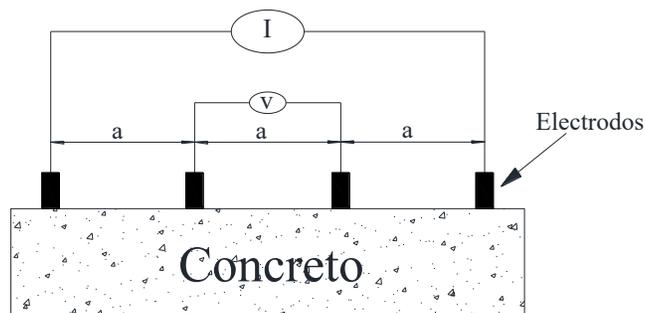


Figura 9. Medición de la prueba de resistividad en el concreto.

2.5.- Pruebas complementarias

2.5.1.- Prueba de resistencia a la penetración de fluidos (ión cloruro)

Esta prueba determina la conductancia eléctrica del concreto; proporciona una indicación rápida de su resistencia a la penetración de iones de cloruro.

Su principio es que un espécimen saturado en agua, de 100 mm de diámetro y 50 mm de espesor, se coloca en una celda conteniendo fluidos en dos contenedores. Para la prueba, uno de los contenedores se llena con una solución al 3 % NaCl y el otro con solución 0.3N NaOH. Se aplica un potencial de 60 VCD a través de la celda. La terminal negativa se conecta en el contenedor con NaCl y la terminal positiva se conecta al contenedor con NaOH. Los iones cloruros cargados negativamente migrarán hacia la terminal positiva.

Entre más permeable sea el concreto, más iones cloruro viajarán a través del espécimen, y una mayor corriente será medida. La corriente se mide por 6 horas. Se determina el área bajo la curva contra el tiempo, la cual representa la carga total en Coulombs que pasaron a través del espécimen. Los valores de la cantidad de Coulombs se utilizan para caracterizar el concreto y se establecen en la norma ASTM-C-1202²³, tabla 4:

Tabla 4. Criterios para evaluar la permeabilidad al ión cloruro.

Coulombs	Clase de permeabilidad
> 4000	Alta
4000-2000	Moderada
2000-1000	Baja
1000-100	Muy baja
<100	Insignificante

2.5.2.- Difracción de rayos X

La difracción de rayos X puede proporcionar información detallada de la estructura tridimensional en estado sólido de muestras cristalinas de compuestos orgánicos e inorgánicos, consistiendo en la descripción geométrica en términos de distancias y ángulos de enlace, un ejemplo típico se muestra en la Figura 10.

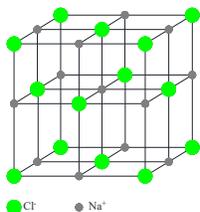


Figura 10. Ordenamiento atómico del NaCl

2.5.2.1.- Clasificación del estado sólido.

Dependiendo de la distribución interna que sostienen los átomos, los sólidos pueden ser clasificados en cristalinos, amorfos y policristalinos, Figura 11. Los sólidos amorfos no poseen una estructura atómica definida. Los policristalinos están divididos en regiones o gránulos que poseen estructuras propias definidas pero de tamaños y orientaciones irregulares. Los sólidos cristalinos se diferencian porque sus átomos constituyentes se encuentran distribuidos en forma regular a través del cuerpo²⁴.

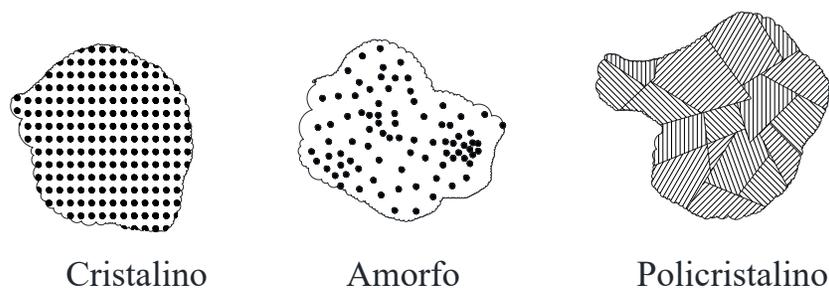


Figura 11. Ordenamiento de los sólidos según su estructura atómica.

2.5.2.2.- Estructura cristalina ordenada.

En la estructura cristalina (ordenada) de los materiales inorgánicos, los elementos que se repiten son átomos o iones enlazados entre sí, de manera que generalmente no se distinguen unidades aisladas; estos enlaces proporcionan la estabilidad y dureza del material. En los materiales orgánicos se distinguen claramente unidades moleculares aisladas, caracterizadas por uniones atómicas muy débiles, dentro del cristal. Son materiales más blandos e inestables que los inorgánicos.

La ordenación espacial y el tamaño de los cristales pueden ponerse de manifiesto mediante la difracción de rayos X. Cuando un haz de rayos X incide sobre la superficie de un sólido ordenado regularmente se produce una difracción descrita por la Ley de Bragg.

La ley de Bragg consiste en imaginar la difracción como una reflexión de los rayos X originada por "espejos" imaginarios formados por planos de átomos de la red cristalina (mostrados como líneas horizontales que pasan por los centros dispersores, es decir, por los átomos que se muestran como círculos en la Figura 12). Debido a la naturaleza repetitiva del cristal, estos planos estarían separados entre sí por distancias constantes **d**.

Los dos haces de rayos X, de longitud de onda λ , inciden en fase sobre sendos planos imaginarios, con un ángulo de incidencia θ , y forman un frente de ondas (primera línea verde de la izquierda).

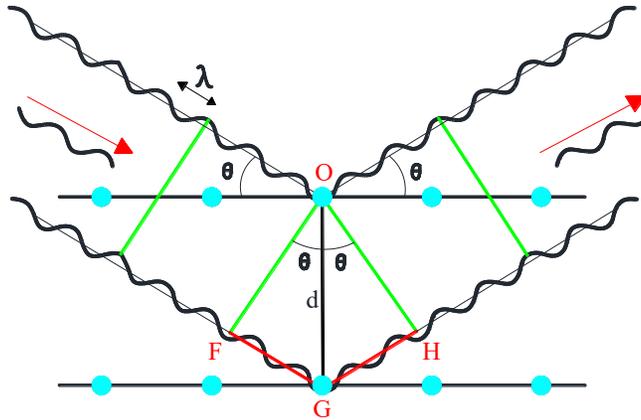


Figura 12. Representación de la ley de Bragg²⁵.

Para que exista reflexión cooperativa es necesario que tras la reflexión ambos haces sigan estando en fase (última línea verde de la derecha), situación que sólo ocurrirá si la diferencia de caminos recorridos por los frentes de onda **OF** y **OH** (frentes de onda antes y después de la reflexión) es un número entero de veces la longitud de onda.

Esa condición equivale a decir, que la suma de los segmentos **FG** y **GH** corresponde a un número entero (**n**) de veces la longitud de onda (λ):

$$\mathbf{FG} + \mathbf{GH} = \mathbf{n} \cdot \lambda \quad (1)$$

pero **FG = GH** y $\mathbf{sen} \theta = \mathbf{FG} / d$

es decir: **FG = d sen θ**

con lo que la expresión (1) se convierte en:

$$2 d \mathbf{sen} \theta = \mathbf{n} \cdot \lambda$$

que es la bien conocida ley de Bragg.

La técnica de Rayos-X puede ser aplicada tanto al análisis cualitativo como al cuantitativo.

- Es posible identificar los compuestos químicos cristalinos que constituyen a un material.
- Permite evaluar la proporción de estos compuestos y si es necesario, determinar si el compuesto de interés se encuentra presente en la muestra.

Aplicaciones de la difracción de rayos X.

- ✓ Determinación mineralógica y cristalográfica de cualquier tipo de material de tipo cristalino.
- ✓ Estudios de transformación de fases en función de la temperatura desde 24°C hasta – 160°C.
- ✓ Análisis cuantitativo de fases.
- ✓ Determinación de tamaño de cristal
- ✓ Determinación cuantitativa de amorfos en polímeros medianamente cristalinos.
- ✓ Determinación cuantitativa de elementos en aceros al carbón e inoxidable.

2.5.2.3.- Método de polvos

Es el más utilizado en el estudio de materiales cristalinos. Dicho método consiste en hacer pasar un haz de Rayos X a una muestra previamente depositada en un portaobjetos con un espesor homogéneo.

Equipo de difracción de rayos X, consta de las siguientes partes:

- a) Fuente de rayos-x
- b) Goniómetro de 2 círculos (θ y 2θ)
- c) Portamuestras
- d) Detector
- e) Computadora para control del instrumento y análisis de datos.

Preparación de la muestra

- ✓ Primero molienda
- ✓ Segundo tamizado
- ✓ Tercero montaje del portamuestras.



Molienda



Tamizado



Montaje

2.5.2.4.- Metodología.

En esta técnica se usan muestras sólidas y tamizadas preferentemente que pasen la malla No 200. Las muestras se depositan sobre un portamuestra, evitando, en lo posible, la orientación preferente de los cristales. Sobre la muestra se hace incidir un haz de rayos X (lo más cercano

a lo monocromático). Los rayos difractados (diferentes para cada cristal) son registrados y traducidos en un difractograma en un ordenador, Figura 13.

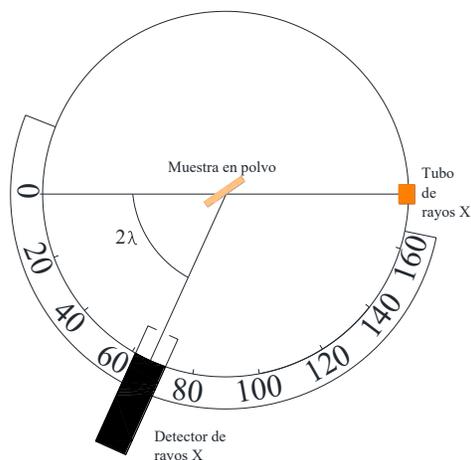


Figura 13. Diagrama de un difractómetro, mostrando el haz incidente y el haz difractado, la muestra en polvo y el detector de rayos X.

2.5.3.- Espectroscopia de dispersión de energía (EDS)

La técnica de caracterización EDS utiliza los rayos X característicos provenientes de una muestra para identificar y cuantificar los porcentajes atómicos de los elementos presentes en ella. Consiste en bombardear al objeto con electrones primarios los cuales si tienen la energía apropiada generan la emisión de rayos X característicos provenientes de la muestra analizada. Cuando el haz de electrones de alta energía interactúa con la muestra, expulsa electrones de las capas internas dejando vacancias. Con esto se tiene un átomo ionizado el cual regresa a su estado fundamental emitiendo fotones de rayos X característicos. Estas transiciones electrónicas en forma de fotones de rayos X corresponden a transiciones entre capas externas y la capa K. Esta espectroscopia se realiza habitualmente en un microscopio electrónico. El componente principal de un espectrómetro EDS es un detector de estado sólido el cual produce por cada fotón incidente un pulso de voltaje proporcional a su energía. Cada vez que un fotón de rayos X incide sobre el detector se crea una pequeña corriente producto de la remoción de un electrón del detector hecho generalmente de silicio. Cada electrón eyectado consume una energía de alrededor de 3.8 eV suministrada por el haz de rayos X. Por lo tanto, un fotón de rayos X que tuviera una energía inicial de 7.471eV (Ni $K\alpha$) producirá una corriente de 1.966 electrones. Así, la energía inicial de cada fotón de rayos X se podrá determinar midiendo la cantidad de corriente producida. Con esta información, se podrá construir un histograma que cuenta el número de fotones de rayos existentes en cada valor particular de energía.

La energía e intensidad de los rayos X característicos del material, depende de la composición de la muestra, Figura 14. Estos rayos X se captan en un sensor que convierte a esta señal en un voltaje que es proporcional a la energía del fotón de rayos X.

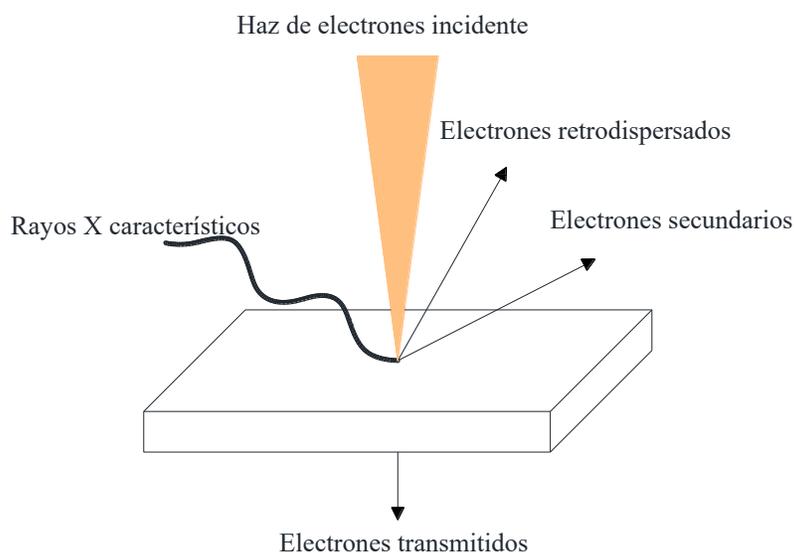


Figura 14. Muestra el análisis de un material por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X.

2.6.- Pruebas en estado fresco.

2.6.1.- Revenimiento

La prueba de revenimiento muestra la consistencia del concreto, siendo ésta un índice de la facilidad de colocar, manejar y compactar el concreto.

Esta prueba se realiza como lo indica la NMX C 156²⁶ y la recomiendan las normas ASTM C 143²⁷, y ASTM C 1362²⁸.

2.6.2.- Contenido de aire

El contenido de aire en el concreto fresco compactado es un parámetro muy importante para conocer el comportamiento del concreto sometido a temperaturas de congelación. Esta prueba proporciona el porcentaje de contenido de aire en el concreto fresco con respecto al volumen del concreto; la medición se basa en el cambio de volumen del agua que se añade en la prueba al concreto fresco al someter este conjunto a un cambio de presión, como lo establecen la NMX C 157²⁹ y el método de la ASTM C 231³⁰.

2.6.3.- Peso volumétrico del concreto fresco

La obtención del peso volumétrico del concreto se utiliza para determinar el peso por metro cúbico de concreto. Esta prueba se realiza de acuerdo con la NMX C-162³¹ y como lo recomienda la ASTM C 29³², ASTM C 138³³, dividiendo el peso neto del concreto fresco

entre el volumen del recipiente que lo contiene. También es utilizado para calcular el rendimiento del diseño de la mezcla; para comprobar que se obtenga el metro cubico con las dosificaciones de diseño.

2.7.- Pruebas mecánicas

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

2.7.1.- Prueba de resistencia mecánica a compresión simple

Esta prueba permite determinar la resistencia a compresión de muestras de concreto; consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros de concreto, a velocidad controlada, hasta el momento que ocurra la falla; la resistencia a la compresión del espécimen se calcula dividiendo la carga máxima soportada durante la prueba entre el área de la sección transversal del cilindro, bajo la Norma NMX C 083³⁴ y ASTM C 39³⁵.

2.7.2.- Prueba del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson del concreto a compresión

Esta prueba permite la determinación:

- a) Del módulo de elasticidad de Young.
- b) De la relación de Poisson en cilindros de concreto.

La prueba proporciona la relación entre esfuerzo y deformación unitaria longitudinal del espécimen, así como la relación entre las deformaciones unitarias transversales y longitudinales. Las pruebas se realizaran, bajo la Norma NMX C 128³⁶ y ASTM C 469³⁷.

3.- DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la investigación se realizan las siguientes actividades:

- Selección de los materiales a usar, tomando en cuenta los estándares de calidad y las normas mexicanas (NMX) que estandarizan su calidad o en su caso alguna norma o recomendación internacional para el concreto.
- Estudios de laboratorio para los agregados. Se usa arena andesita y grava caliza de $\frac{3}{4}$ ". De los estudios se obtiene: la densidad, el peso volumétrico suelto y compactado, la absorción, la humedad, las granulometrías y el módulo de finura de la arena.
- Diseño de las mezclas a analizar toman en cuenta la resistencia a compresión que se quiere y se determina la relación agua/cemento (a/c).
- Cuantificar las cantidades de material que se usarán en las diferentes mezclas de acuerdo con las pruebas que se realizarán para obtener los parámetros requeridos y poder desarrollar un análisis confiable de los datos finales.
- Elaboración de mezclas preliminares; se realizan básicamente para que las mezclas sean lo más congruentes en todos los aspectos, con las mezclas de diseño y su elaboración sea conforme a lo planeado.
- Someter a las pruebas mecánicas de laboratorio los especímenes de acuerdo con la edad de colado.

- Monitorear la corrosión, en los especímenes especialmente elaborados para este fin; después del colado, en cuanto se pueda utilizar el equipo para realizar las mediciones; y después de 28 días de curado se sumergirán en soluciones de cloruros a diferentes concentraciones y se seguirá monitoreando la actividad de la corrosión para un mejor análisis.
- Obtención de resultados y el análisis de los mismos, tomando en cuenta recomendaciones del American Concrete Institute (ACI), ASTM y de las Normas Mexicanas.

3.1.- Materiales

3.1.1.- Cemento

El cemento utilizado: Cemento Pórtland Ordinario, por ser el cemento con las cantidades de adiciones minerales más bajas, y así conocer el comportamiento del concreto realizado con este cemento para el estudio.

3.1.2.- Agua para mezclado

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

La Norma NMX C-122³⁸ establece los requisitos de cantidades máximas de impurezas que son tolerables para el agua que se utiliza en la elaboración de mezclas de concreto. Las normas NMX C-252³⁹ y NMX C-253⁴⁰, establecen algunos otros requisitos para el caso específico de la fabricación de mezclas para elementos de concreto presforzado.

3.1.3.- Agregados

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

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

El tamaño de las partículas del agregado fino es menor a 4.75 mm (tamiz N. 4) de diámetro, según establece la Norma NMX C-111⁴¹. El tamaño de las partículas de los agregados gruesos no es mayor a 19 mm (3/4"). Los agregados son caracterizados mediante pruebas de laboratorio para encontrar las propiedades básicas como la densidad, el peso volumétrico compacto, la absorción, la humedad, las granulometrías y el módulo de finura de la arena, según se establece en las normas ASTM C127⁴², C128⁴³, C29³², C70⁴⁴, respectivamente.

3.1.4.- Humo de sílice

El humo de sílice (HS) es un material puzolánico de alta reactividad, subproducto del desecho de la fabricación de silicio metálico y aleaciones de ferrosilicio. Su proceso es resultado de la reducción de cuarzo de pureza elevada (SiO₂) con carbón en hornos de arco eléctrico, a temperaturas mayores a 2000 °C. Debido a su finura, varias veces superior a la del cemento, este compuesto mineral en la mezcla de concreto permite una mayor y mejor oclusión de los poros, mejorando la interfase matriz agregado, y ofreciendo de esta manera un producto más estable, resistente y duradero.

El HS, para su empleo como adición en el concreto, no puede contener sustancias perjudiciales en cantidades tales que puedan afectar la durabilidad del material, o causar la corrosión de las armaduras. La Norma ASTM C 1240⁴⁵, reguladora del uso del HS como adición en el concreto, establece que el contenido de óxido de silicio deberá ser mayor al 85%. Asimismo, define que la pérdida por ignición y el contenido de humedad deberán ser menores a 6% y 3%, respectivamente. Debe tenerse cuidado en la posible variabilidad de la composición de esta adición, pues al ser un subproducto industrial ésta podría no ser la correcta, afectándose así las propiedades del concreto.

3.2.- Diseño de las mezclas de concreto

Para el diseño y preparación correcta del concreto deseado, se toman en cuenta características básicas obtenidas en laboratorio de los agregados tales como la densidad, el módulo de finura y la humedad. Según lo establecido en las normas ASTM C-127⁴², C-128⁴³, C-29³², C-70⁴⁵.

a) Datos obtenidos en laboratorio de los agregados utilizados en el concreto son:

Arena andesítica;

Peso volumétrico compacto = 1367 kg/m³

Densidad (ρ) = 2.23 gr/cm³

Absorción = 6.73 %

Módulo de finura = 3.21

Grava caliza;

Peso volumétrico compacto = 1422 kg/m³

Densidad (ρ) = 2.65 gr/cm³

Absorción = 0.57 %

Tamaño máximo agregado=19 mm (3/4")

Cemento;Densidad (ρ) = 3.12 gr/cm³**b) Características del diseño teórico**

En las tablas 5 y 6 se presentan los diseños de las mezclas testigos y las mezclas con el 1% de cloruros del peso del cemento o del cementante, respectivamente.

Tabla 5. Diseños de las mezclas testigo (en kg/m³).

MATERIALES	Mezclas			
	MT1	MT2	MT3	MT4
	a/c=0,4 f'c= 400 kg/cm ²	a/c=0,4 f'c= 400 kg/cm ²	a/c=0,5 f'c= 350 kg/cm ²	a/c=0,6 f'c= 300 kg/cm ²
Agua	190.00	190.00	190.00	190.00
Cemento	475.00	451.25	380.00	316.67
Grava	906.39	906.39	948.35	976.32
Arena	700.91	700.91	733.35	754.98
Humo de Sílice		23.75		
Cloro				
Aditivo (litros)	6.78	5.42	4.18	3.17

Donde

MT1, es la muestra testigo 1

MT2, es la muestra testigo 2

MT3, es la muestra testigo 3

MT4, es la muestra testigo 4

Tabla 6. Diseño de mezclas con una concentración de cloro del 1% del peso del cemento (en kg/m³).

MATERIALES	Mezclas			
	M1C-1	M2C-1	M3C-1	M4C-1
	a/c=0,4 f'c= 400 kg/cm ²	a/c=0,4 f'c= 400 kg/cm ²	a/c=0,5 f'c= 350 kg/cm ²	a/c=0,6 f'c= 300 kg/cm ²
Agua	190.00	190.00	190.00	190.00
Cemento	475.00	451.25	380.00	316.67
Grava	906.39	906.39	948.35	976.32
Arena	700.91	700.91	733.35	754.98
Humo de Sílice		23.75		
Cloro	4.75	4.75	3.80	3.17
aditivo (litros)	7.35	6.32	4.94	3.80

Donde

M1C-1, es la muestra 1 con el 1% de cloro del peso del cemento.

M2C-1, es la muestra 2 con el 1% de cloro del peso del cementante (cemento+humo de sílice).

M3C-1, es la muestra 3 con el 1% de cloro del peso del cemento.

M4C-1, es la muestra 4 con el 1% de cloro del peso del cemento.

3.3.- Pruebas de laboratorio

Estos concretos se someterán a las pruebas electroquímicas y pruebas mecánicas de compresión simple, módulo de elasticidad, y permeabilidad al ión cloruro. Por lo que se deberán realizar las mezclas con el volumen necesario para obtener:

- 3 cilindros de 15 cm x 30 cm, para la prueba de compresión a los 7 días.
- 3 cilindros de 15 cm x 30 cm, para la prueba de compresión a los 14 días.
- 4 cilindros de 15 cm x 30 cm, para la prueba de compresión y de módulo de elasticidad a los 28 días.
- 4 cilindros de 15 cm x 30 cm, para la prueba de compresión y de módulo de elasticidad a los 90 días.
- 3 cilindros de 10 cm x 20 cm, para la prueba de permeabilidad al ión cloruro a los 28 días.
- 3 cilindros de 10 cm x 20 cm, para la prueba de permeabilidad al ión cloruro a los 90 días.
- 9 vigas de 6x6 cm x 30 cm, para instrumentarlos con acero embebido y monitorear su corrosión.

Para cada una de las mezclas propuestas anteriormente se requiere un volumen total de 115 L, aproximadamente, para fabricar todos los especímenes, realizar las pruebas al concreto fresco y el porcentaje de desperdicio esperado.

3.4.- Soluciones para monitorear la corrosión

Las soluciones a las que se sometieron los especímenes después de 28 días de su colado, para monitorear la corrosión en el acero de refuerzo tienen tres concentraciones:

1. Solución con una concentración significativamente baja en sales, principalmente el contenido de cloruros, alrededor de 5000 ppm de cloruros.
2. Solución con una concentración en sales igual al agua de mar, con un aproximado de 15000 ppm de cloruros.
3. Solución con una concentración más alta en sales, teniendo el conocimiento de que hay zonas lacustres, como el ex lago de Texcoco, en la ciudad de México, con mediciones de 45000 ppm.

4.- RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

La dosificación del aditivo se realizó según su ficha técnica. El aditivo usado es el Eucon 37, es un reductor de agua de alto rango superplastificante. La razón principal por la cual se hizo esta elección es que este aditivo no contiene cloruros en su composición química, además de la característica de ser un superplastificante. Las dosificaciones por metro cubico se muestran en las tablas 5 y 6.

4.1.- Resultados en estado fresco

En las tablas 7 y 8, se muestran los resultados de las pruebas en el concreto en estado fresco.

Tabla 7. Resultados de las pruebas en estado fresco de las mezclas testigo

Prueba	Mezclas			
	MT1	MT2	MT3	MT4
Peso volumétrico (kg/m ³)	2 321	2 336	2 281	2 285
Revenimiento(cm)	8.0	10.6	13.8	13.6
Contenido de aire (%)	2.0	2.1	1.6	1.8

Tabla 8. Resultados de las pruebas en estado fresco de las mezclas con el 1% de cloruros del peso del cemento o cementante.

Prueba	Mezclas			
	M1C-1	M2C-1	M3C-1	M4C-1
Peso volumétrico (kg/m ³)	2 273	2 288	2 295	2 275
Revenimiento(cm)	12.4	8.2	13.5	13.5
Contenido de aire (%)	2.4	2.5	2.6	2.0

4.2.- Resultados de las pruebas electroquímicas

Las mediciones electroquímicas se realizaron con el equipo Gecor 10, equipo especializado para realizar pruebas electroquímicas del concreto endurecido. Las mediciones se registraron a partir del colado de las mezclas, en cuanto el concreto endurece lo suficiente para poder manipularlo, aproximadamente una o dos horas después.

En las gráficas siguientes se muestran los resultados obtenidos de las pruebas electroquímicas; se presentan en ocho comparativas diferentes para determinar el efecto de las variables en los resultados de los ensayos.

Las comparativas 1 y 2 son para determinar el efecto del humo de sílice.

Comparativa 1: muestra los resultados de los concretos MT1 y MT2.

Comparativa 2: muestra los resultados de los concretos M1C-1 y M2C-1.

Las comparativas 3 y 4 son para determinar el efecto de la relación a/c.

Comparativa 3: muestra los resultados de los concretos MT1, MT3 y MT4.

Comparativa 4: muestra los resultados de los concretos M1C-1, M3C-1 y M4C-1.

Las comparativas 5, 6, 7 y 8 son para determinar el efecto de la incorporación de cloruros.

Comparativa 5: muestra los resultados de los concretos MT1 y M1C-1.

Comparativa 6: muestra los resultados de los concretos MT2 y M2C-1.

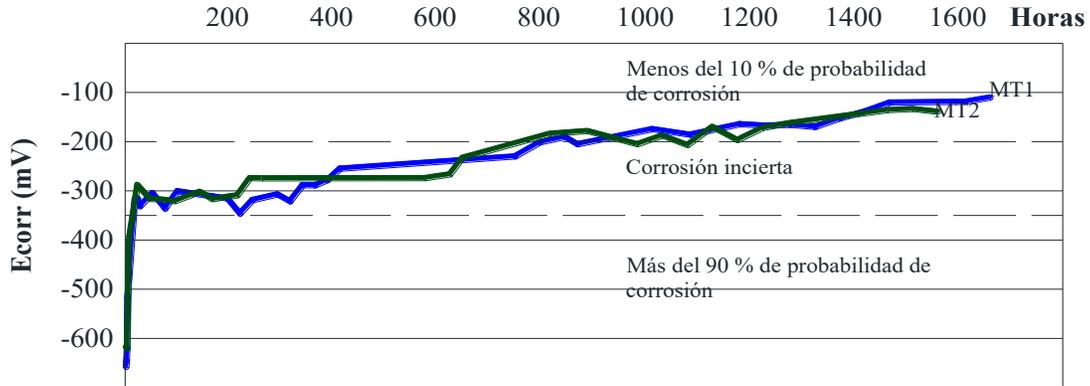
Comparativa 7: muestra los resultados de los concretos MT3 y M3C-1.

Comparativa 8: muestra los resultados de los concretos MT4 y M4C-1.

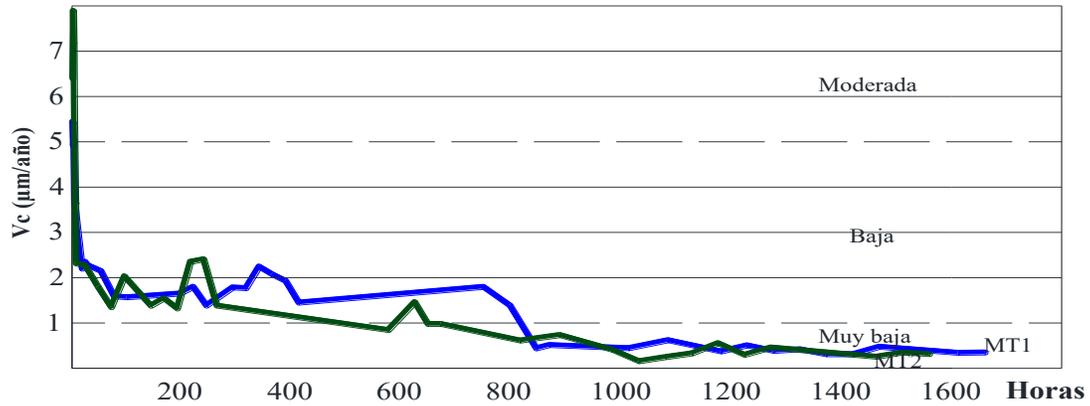
Los resultados de todas las pruebas electroquímicas se muestran en el Anexo 1.

Resultados de la Comparativa 1.

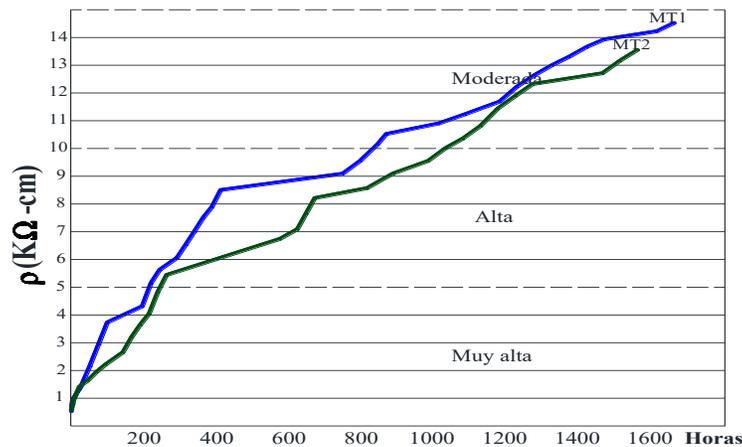
En las gráficas 1, 2 y 3, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT1 y MT2, sumergidos en solución de cloruros de 5000 ppm.



Gráfica 1. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT1 y MT2.

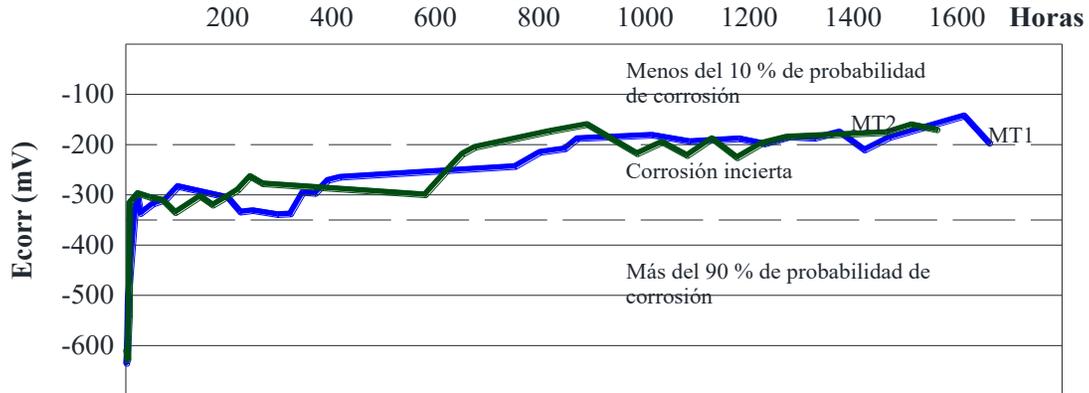


Gráfica 2. Velocidad de corrosión en $\mu\text{m/año}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT1 y MT2.

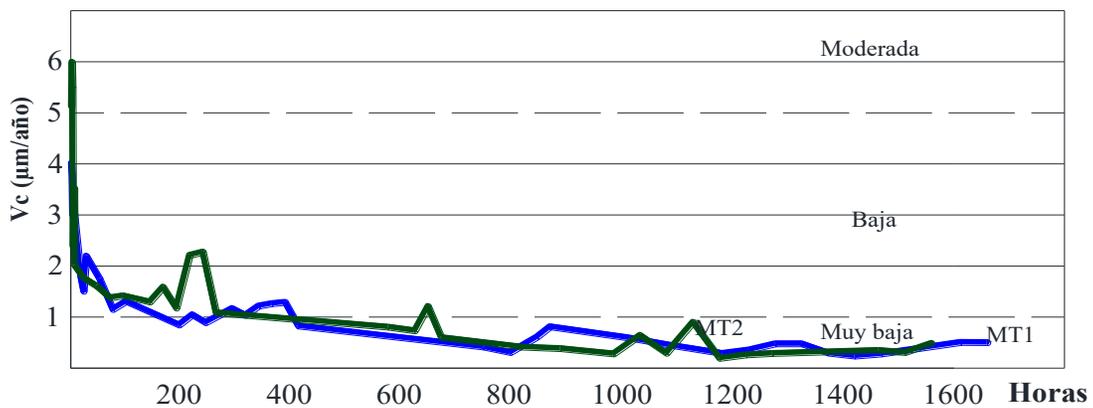


Gráfica 3. Resistividad en $\text{K}\Omega\text{-cm}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT1 y MT2.

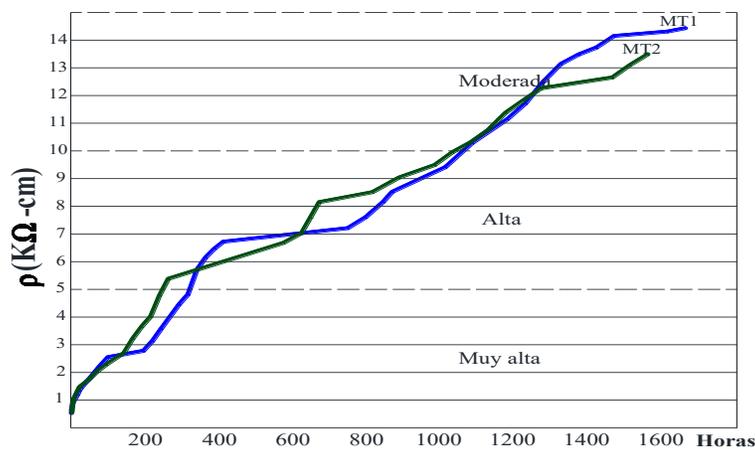
En las gráficas 4, 5 y 6, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT1 y MT2, sumergidos en solución de cloruros de 15000 ppm.



Gráfica 4. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT1 y MT2.

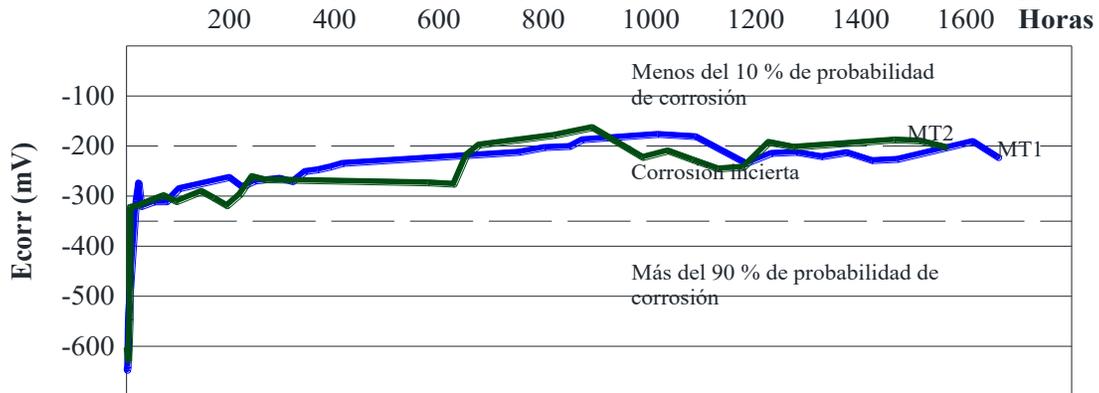


Gráfica 5. Velocidad de corrosión en µm/año contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT1 y MT2.

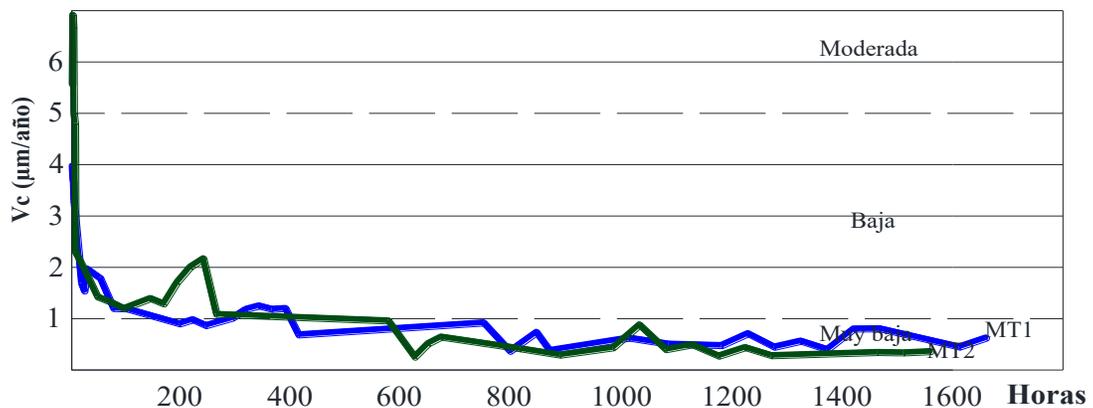


Gráfica 6. Resistividad en KΩ-cm contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT1 y MT2.

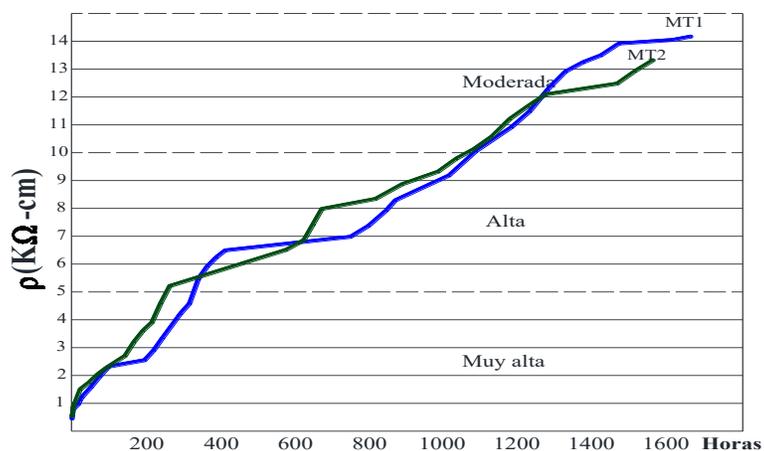
En las gráficas 7, 8 y 9, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT1 y MT2, sumergidos en solución de cloruros de 45000 ppm.



Gráfica 7. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT1 y MT2.



Gráfica 8. Velocidad de corrosión en $\mu\text{m/año}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT1 y MT2.



Gráfica 9. Resistividad en $\text{K}\Omega\text{-cm}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT1 y MT2.

En la comparativa 1 para determinar la influencia del humo de sílice en el concreto de las muestras testigo, imágenes 1 y 2, se puede observar que el comportamiento del potencial de corrosión, en las primeras horas después del colado presenta un ambiente muy corrosivo, pues en las mediciones obtenidas muestra que el potencial es menor a -350 mV, teniendo en cuenta la Norma ASTM-C-876. En la primera medición de la comparativa 1 formado por los concretos MT1 y MT2, cerca de las primeras 2 horas después del colado, en promedio se obtuvo potenciales de -640 mV. Dentro de las primeras 24 horas se puede notar que el comportamiento tiende a registrar potenciales más positivos, esto se debe a que durante el fraguado del concreto, hace que el pH cambie hacia valores más cercanos a 12.5, donde los óxidos e hidróxidos predominan formando una capa pasiva protectora⁴⁶. Después del proceso de curado el potencial se estabiliza alrededor de los -200 mV, en todos los especímenes, sin embargo al meter los especímenes en las soluciones salinas después de 28 días del colado, al paso del tiempo empieza un comportamiento diferente. En los especímenes en contacto con la solución salina con 5000 ppm de iones Cl⁻, el potencial tiende a hacerse más positivo; esto indica que la calidad del concreto mejora, sin embargo, es necesario tener en cuenta que la penetración de los iones cloruro con el tiempo éstos serán perjudiciales para el sistema acero-concreto. En los especímenes que estuvieron en la solución de 15000 ppm de iones Cl⁻, se nota que el potencial de corrosión se mantiene alrededor de los -200 mV, por lo que se puede argumentar que el concreto se mantiene en un estado poco probable para que la corrosión ocurra. Por el contrario, en los especímenes que estuvieron en contacto con la solución de 45000 ppm de iones Cl⁻, después de un tiempo de aproximadamente de 1000 horas después del colado y aproximadamente 300 horas después del contacto con la solución salina, sus registros de potencial tienden a hacerse más negativos, y esto de acuerdo con la Norma ASTM-C-876, indica que este concreto se está deteriorando al tener un potencial de corrosión incierta y tendiendo a que la probabilidad de corrosión sea cada vez mayor. Un aspecto a considerar en este análisis de estos dos concretos, es que el concreto MT2 varía su potencial entrando en contacto con la solución salina, sin embargo, su comportamiento es más estable que el concreto MT1, pues sin tener en cuenta en que solución se sumerjan los especímenes reportan potenciales cercanos a los -200 mV.

En la comparativa 1 se observa que la actividad de la velocidad de corrosión es muy similar en estos concretos, en promedio registrando 6.5 $\mu\text{m}/\text{año}$ a las primeras 2 horas, y después de 24 horas esta velocidad de corrosión disminuye drásticamente hasta llegar a cerca de 2.0 $\mu\text{m}/\text{año}$, catalogada esta velocidad de corrosión como baja, y después los registros muestran la misma tendencia en todo el tiempo de estos ensayos hasta llegar a cerca de 0.5 $\mu\text{m}/\text{año}$, categorizando esta medida de velocidad de corrosión en muy baja, con la ligera variación de que el concreto MT2 muestra velocidades de corrosión un poco más bajas a la del concreto MT1. Después de sumergir los especímenes en las diferentes soluciones no se observa cambio alguno, lo que se atribuye a que la capa pasiva está inalterada o aun no sufre cambios pues los iones Cl⁻ en el exterior, disueltos en las soluciones salinas, no están afectando al sistema acero-concreto hasta este momento.

En los resultados de la prueba de resistividad de la comparativa 1, tienen un comportamiento en las primeras horas de registros de la resistividad muy baja, cercanas a $0.5 \text{ K}\Omega\cdot\text{cm}$ lo que indica que el sistema acero-concreto está en un ambiente muy corrosivo, las mediciones de su resistividad después de 24 horas del colado, denota un crecimiento de manera uniforme, llegando a cerca de $10.0 \text{ K}\Omega\cdot\text{cm}$ a las 1100 horas aproximadamente. Considerando estas mediciones se puede determinar que la velocidad de corrosión debe ser considerada como moderada según la Tabla 3 y esta tendencia no cambia de manera general en estos concretos, aun cuando sean sumergidos en las diferentes soluciones salinas.

Dado que el desempeño de los concretos MT1 y MT2 fue similar en todos los casos se puede decir que el humo de sílice no cambio el comportamiento de estos concretos, al menos en esta etapa del ensaye.

Imagen 1, especímenes del concreto MT1, sumergidas en la solución salina de 45000 ppm de iones Cl⁻.

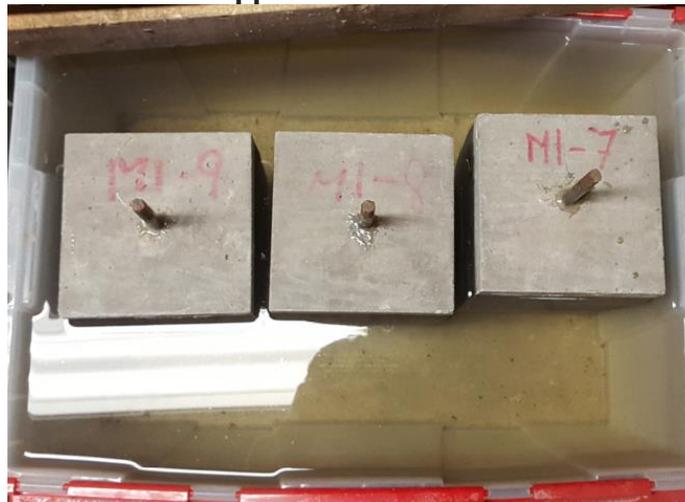
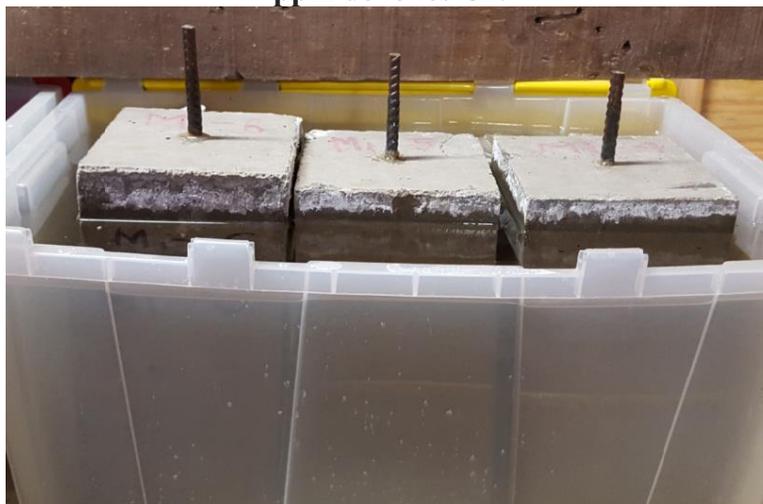
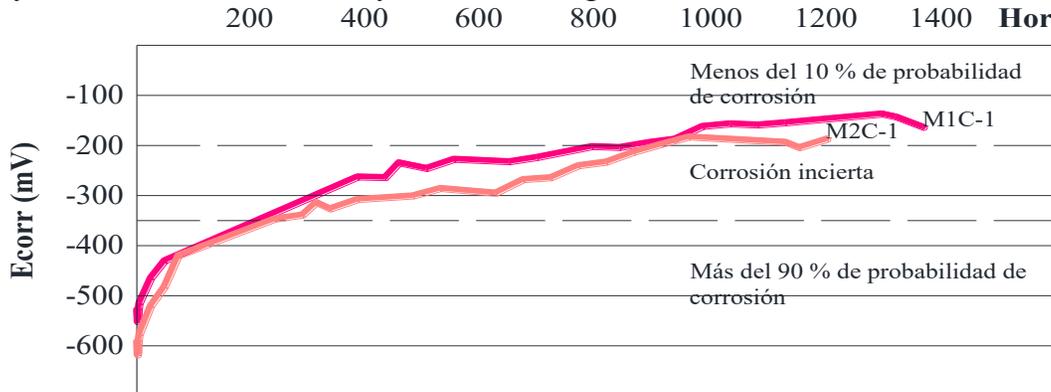


Imagen 2, especímenes del concreto MT2, sumergidas en la solución salina de 45000 ppm de iones Cl⁻.

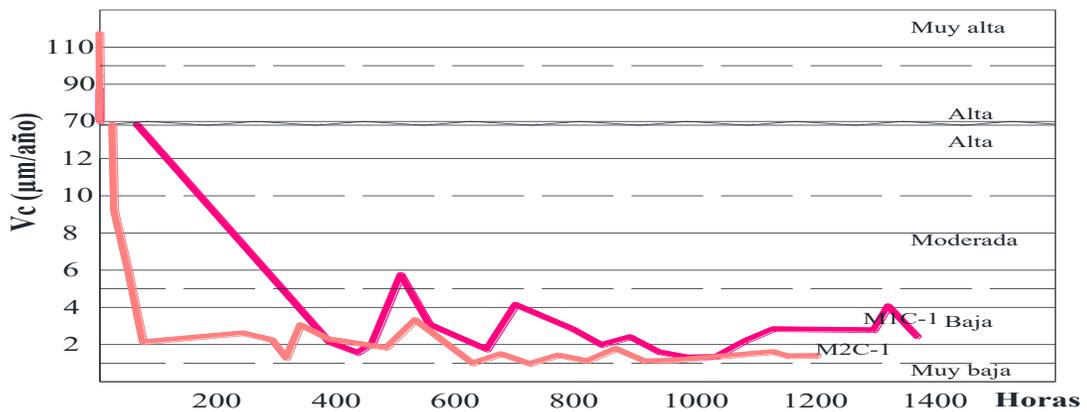


Resultados de la comparativa 2.

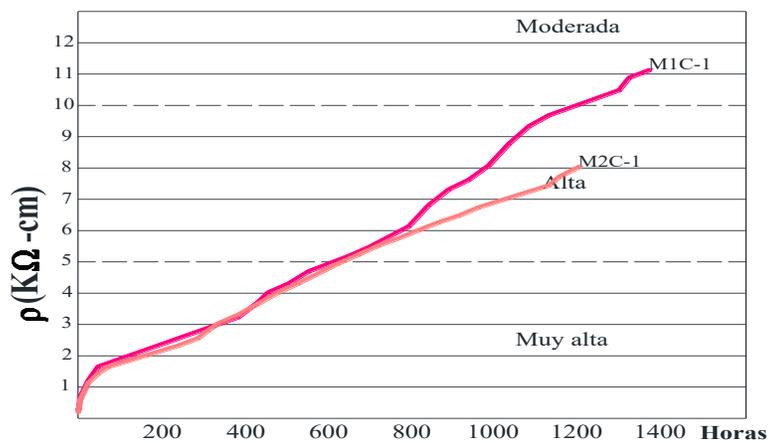
En las gráficas 10, 11 y 12, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos M1C-1 y M2C-1, sumergidos en solución de cloruros de 5000 ppm.



Gráfica 10. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos M1C-1 y M2C-1.

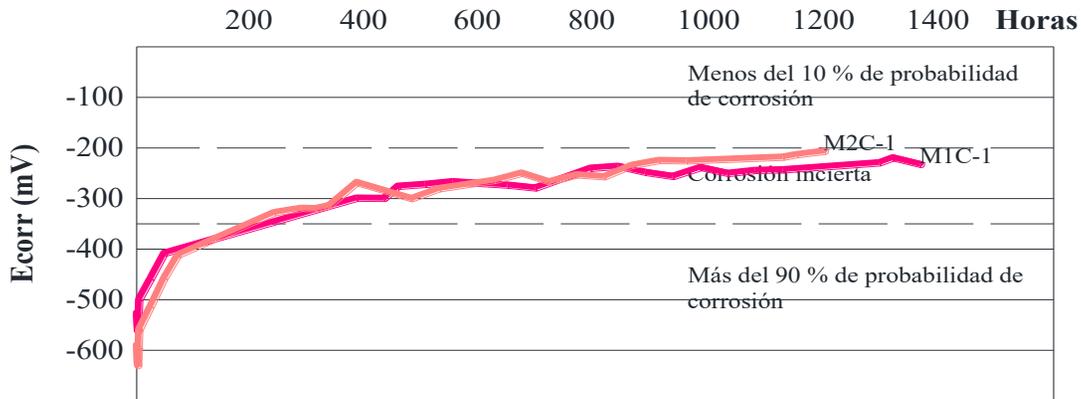


Gráfica 11. Velocidad de corrosión en $\mu\text{m/año}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos M1C-1 y M2C-1.

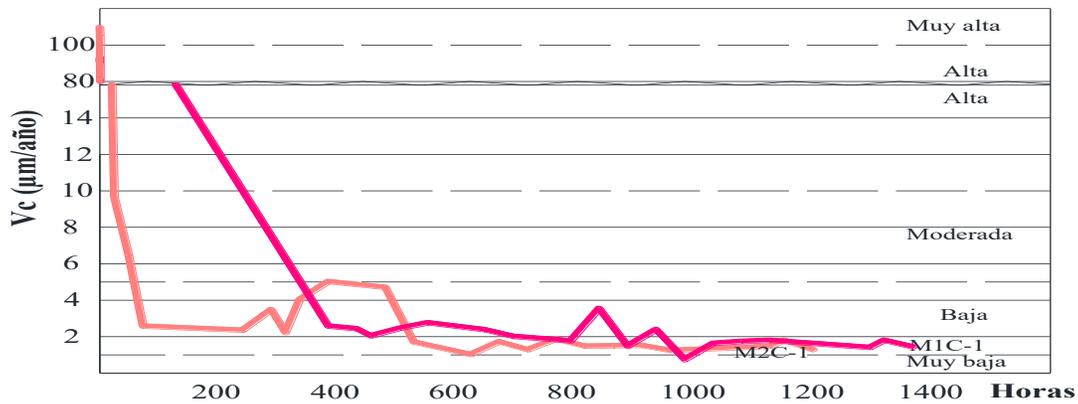


Gráfica 12. Resistividad en $\text{K}\Omega\text{-cm}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos M1C-1 y M2C-1.

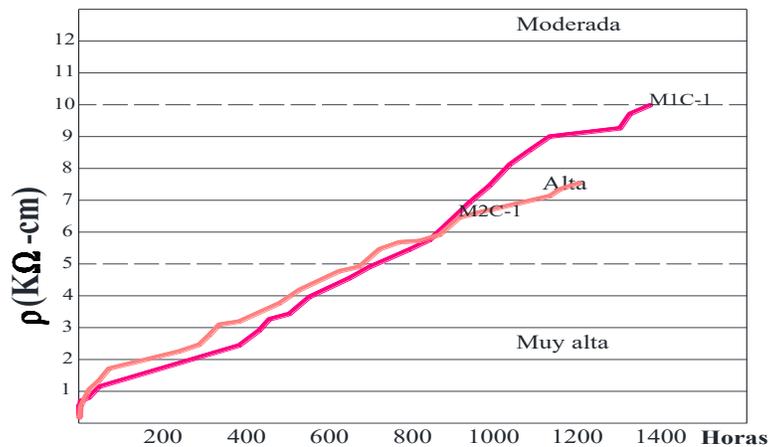
En las gráficas 13, 14 y 15 se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos M1C-1 y M2C-1, sumergidos en solución de cloruros de 15000 ppm.



Gráfica 13. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos M1C-1 y M2C-1.

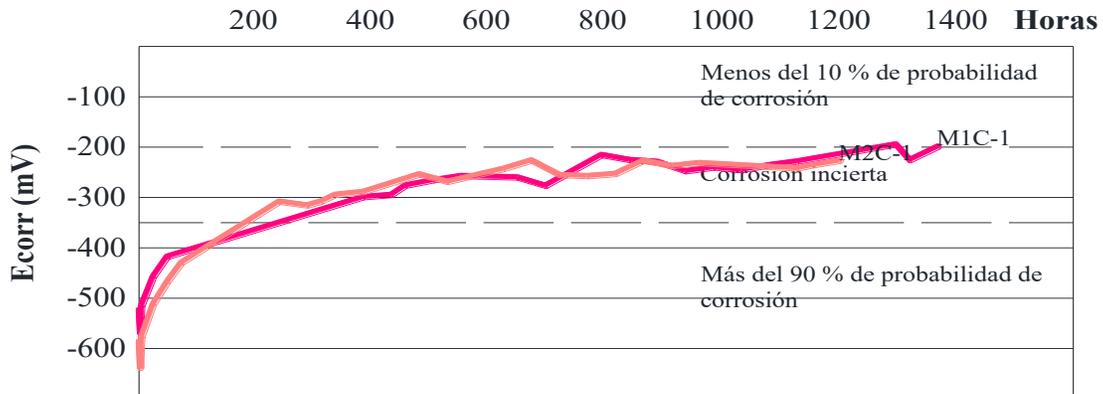


Gráfica 14. Velocidad de corrosión en µm/año contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos M1C-1 y M2C-1.

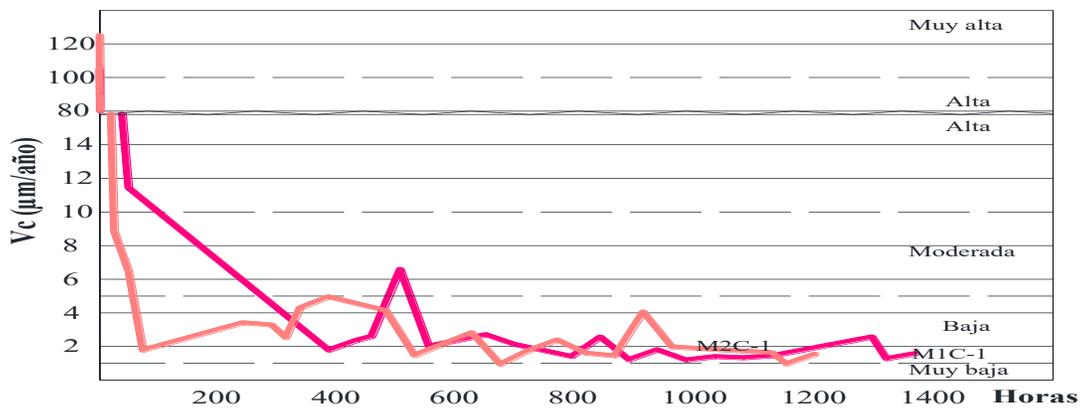


Gráfica 15. Resistividad en KΩ-cm contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos M1C-1 y M2C-1.

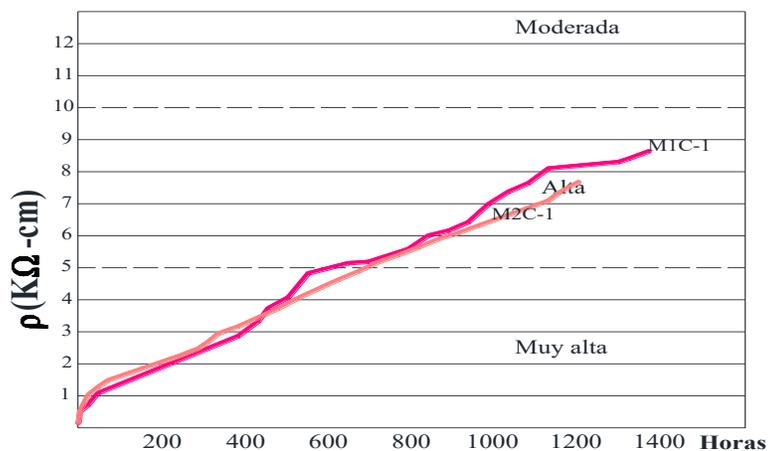
En las gráficas 16, 17 y 18, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos M1C-1 y M2C-1, sumergidas en solución de cloruros de 45000 ppm.



Gráfica 16. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos M1C-1 y M2C-1.



Gráfica 17. Velocidad de corrosión en $\mu\text{m/año}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos M1C-1 y M2C-1.



Gráfica 18. Resistividad en $\text{K}\Omega\text{-cm}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos M1C-1 y M2C-1.

En la comparativa 2 de los concretos M1C-1 y M2C-1 para determinar la influencia de la presencia de cloruros en el desempeño de los concretos, se observa un comportamiento diferente dentro de las primeras horas después del colado; las primeras mediciones en promedio tuvieron potenciales de -600 mV, con la tendencia a hacerse cada vez más positivo, sin embargo, no tienen el mismo comportamiento que los concretos de la comparativa 1, pues dentro de las primeras 24 horas no tienen cambios considerables, pero si tiende a hacerse positivo sin llegar a los -200 mV dentro de las primeras 1000 horas, esto se atribuye al contenido de cloruros añadidos a la mezcla. Después de los 28 días del curado estos concretos tienen la misma tendencia que los concretos de la comparativa 1, pues los especímenes que se sumergieron en solución salina de 5000 ppm de cloruros, el comportamiento del potencial de corrosión tiende a hacerse más positivo de -200 mV; los concretos sumergidos en la solución de 15000 ppm de cloruros, el potencial tiende a permanecer cerca de los -200 mV; en los especímenes sumergidos en la solución salina de 45000 ppm de cloruros, las mediciones del potencial de corrosión tienden a hacerse más negativas después de entrar en contacto con esta solución. Y al igual que en la comparativa 1, en el concreto con humo de sílice, M2C-1, el potencial se mantiene cerca de los -200 mV, al contrario del concreto M1C-1 que varía un poco más, dependiendo de la solución que este en contacto con el espécimen.

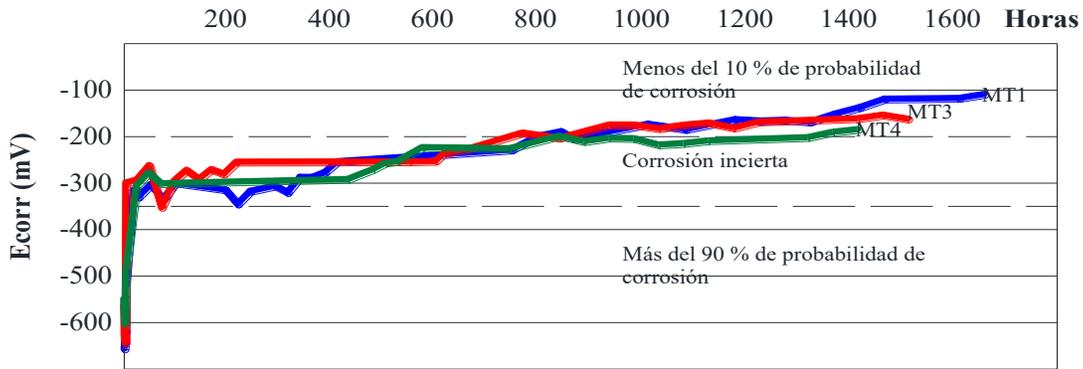
Las velocidades de corrosión de estos concretos en las primeras horas después del colado son de 110 $\mu\text{m}/\text{año}$ en promedio, catalogando estas mediciones como una corrosión muy alta, esto es debido a que los cloruros añadidos a la mezcla en la elaboración del concreto crean un ambiente muy corrosivo, sin embargo, con el fraguado de los concretos, la formación de óxidos e hidróxidos normales en el concreto hacen que la velocidad de corrosión decrezca muy significativamente, hasta llegar a una velocidad de corrosión de 2.0 $\mu\text{m}/\text{año}$ cerca de las 400 horas después del colado, con la tendencia a permanecer cerca de esta misma velocidad de corrosión, catalogando estas mediciones en la zona de baja velocidad de corrosión en los concretos de esta comparativa. Este comportamiento en las velocidades de corrosión es el mismo para todos los especímenes de estos dos concretos, sin importar la solución en la que se hayan sumergido, posiblemente debido a que estos concretos están contaminados con cloruros, pero su actividad corrosiva esta propensa a empezar, sin que sea todavía una velocidad de corrosión que catalogue al sistema acero-concreto como dañado. El concreto con la adición de humo de sílice registra mediciones de velocidad de corrosión un poco más bajas que el concreto sin humo de sílice.

En la comparativa 2 se puede apreciar que la resistividad dentro de las primeras horas es muy baja, debido a la presencia de cloruros en esta etapa del fraguado, lo que hace que el flujo de electrones en el sistema acero-concreto sea muy alto; sin embargo, en las horas siguientes, la resistividad crece en los dos concretos de manera similar hasta llegar cerca de las 900 horas de registros, cuando la tendencia de la resistividad de estos concretos cambia, la tendencia del concreto M1C-1 es a seguir creciendo de igual manera que en las horas anteriores y la del concreto M2C-1 es seguir creciendo pero de manera más lenta que la del concreto M1C-1; aun con esta diferencia la velocidad de corrosión es alta a las 1200 horas aproximadamente,

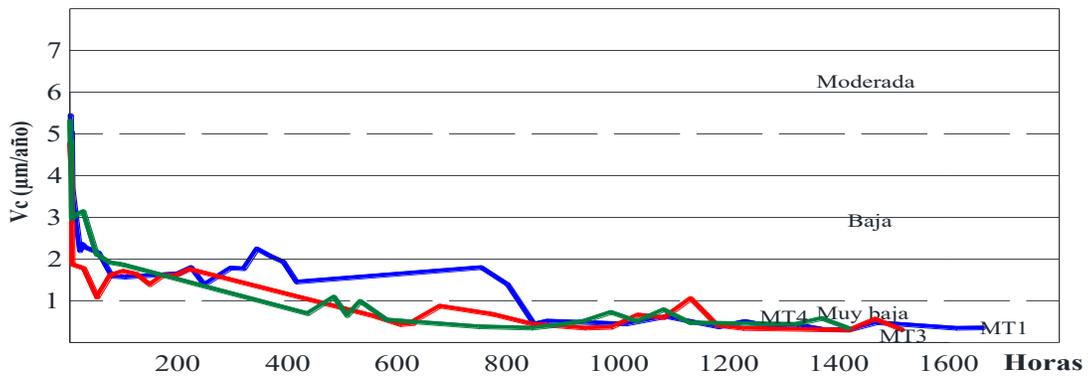
con valor cerca de 8.5 KΩ.cm; en estos concretos no se puede observar un cambio significativo después de que los especímenes fueron sumergidos en las soluciones salinas.

Resultados de la comparativa 3.

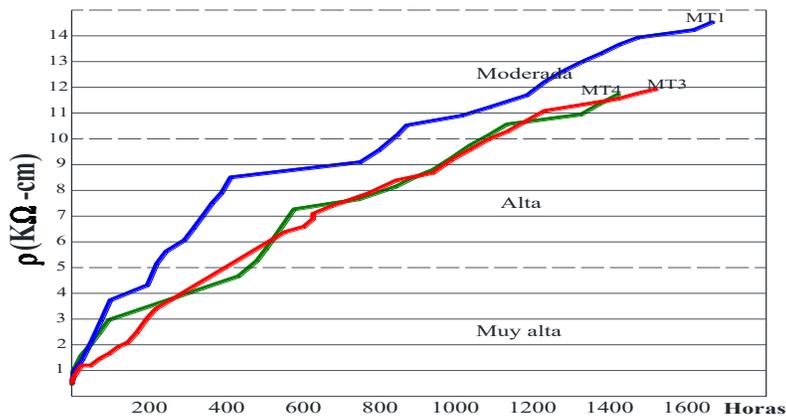
En las gráficas 19, 20 y 21, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT1, MT3 Y MT4, sumergidos en solución de cloruros de 5000 ppm.



Gráfica 19. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT1, MT3 Y MT4.

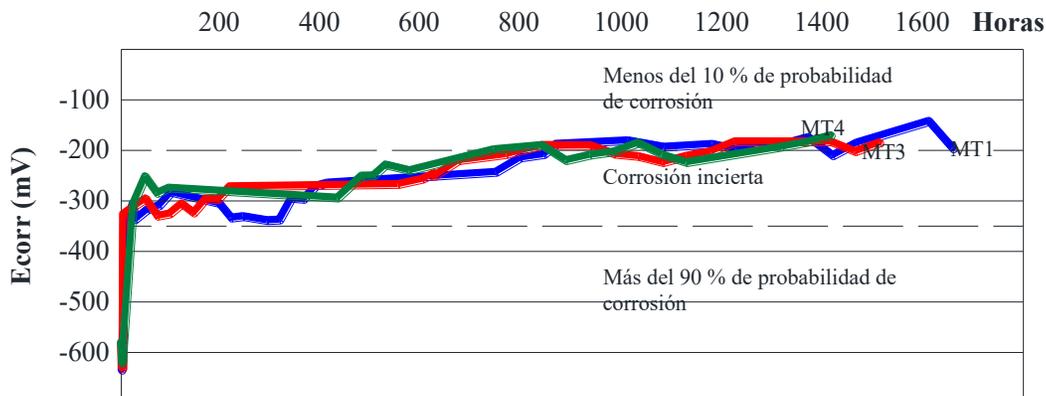


Gráfica 20. Velocidad de corrosión en μm/año contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT1, MT3 Y MT4.

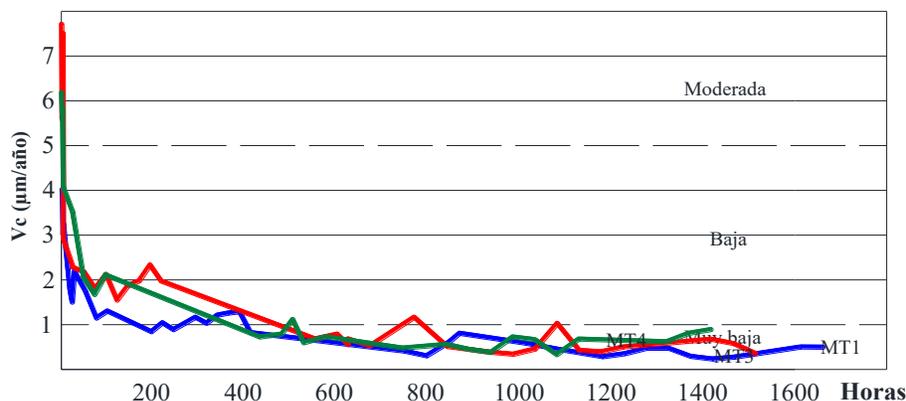


Gráfica 21. Resistividad en KΩ-cm contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT1, MT3 Y MT4.

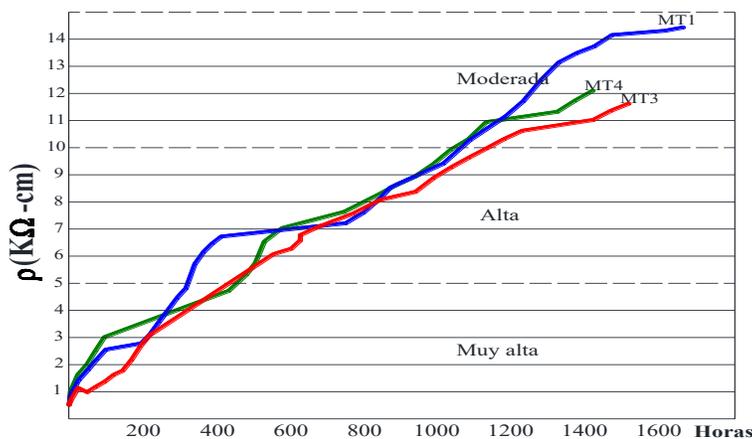
En las gráficas 22, 23 y 24, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT1, MT3 Y MT4, sumergidos en solución de cloruros de 15000 ppm.



Gráfica 22. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT1, MT3 Y MT4.

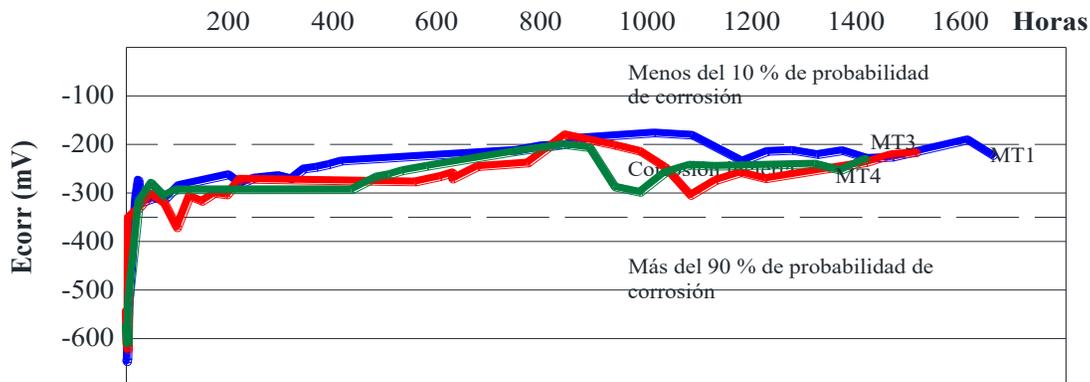


Gráfica 23. Velocidad de corrosión en µm/año contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT1, MT3 Y MT4.

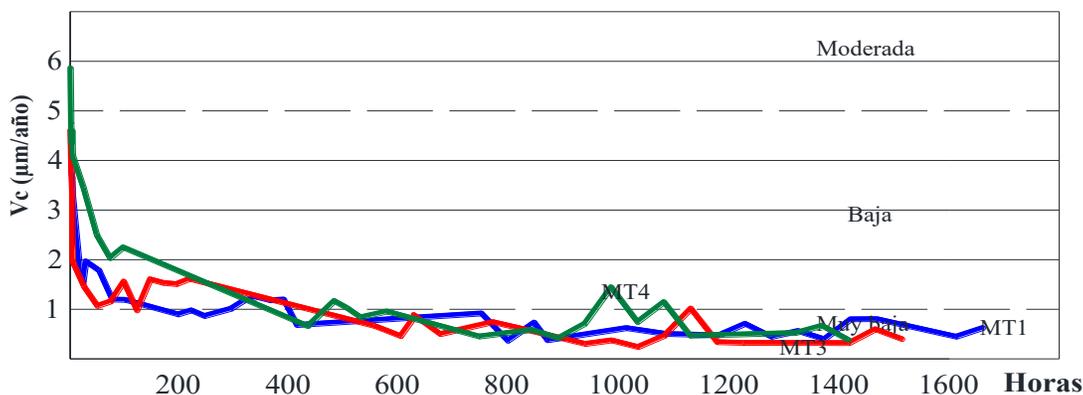


Gráfica 24. Resistividad en KΩ-cm contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT1, MT3 Y MT4.

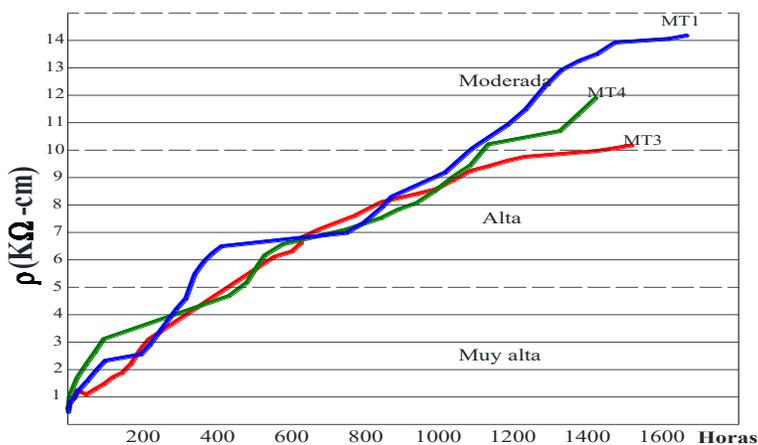
En las gráficas 25, 26 y 27, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT1, MT3 Y MT4, sumergidos en solución de cloruros de 45000 ppm.



Gráfica 25. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT1, MT3 Y MT4.



Gráfica 26. Velocidad de corrosión en µm/año contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT1, MT3 Y MT4.



Gráfica 27. Resistividad en KΩ-cm contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT1, MT3 Y MT4.

Con la comparativa 3 de los concretos MT1, MT3 y MT4 se trata de ver la influencia de la relación a/c en la corrosión del acero de refuerzo, imágenes 3 y 4. La primera medición de los potenciales de corrosión en promedio fue de -600 mV; dentro de las primeras 24 horas la tendencia de estos concretos es hacerse más positivos de forma muy rápida y después de 28 días de curado las mediciones del potencial son muy cercanas a -200 mV, por lo que se puede notar que dentro de estos 28 días de curado el comportamiento del potencial de corrosión es muy similar en todos estos concretos; las diferencias se pueden observar después de que los concretos entran en contacto con las soluciones salinas, pues los especímenes que se sumergen en la solución con 5000 ppm de iones cloruro, tienden a hacerse más positivos con la variante de que el concreto con relación a/c de 0.4, que es el concreto MT1, registra valores más positivos que los otros dos concretos a igualdad de tiempo después del colado. El concreto con relación a/c de 0.5, el concreto MT2, registra valores más positivos que el concreto MT4 con relación a/c de 0.6, lo que indica que un concreto con menor relación a/c tiene mejor comportamiento en su potencial de corrosión. Los especímenes en contacto con la solución salina de 15000 ppm de iones Cl^- , muestran un comportamiento en el potencial de corrosión estable, cerca de -200 mV, con un comportamiento similar a los especímenes sumergidos en la solución salina con 5000 ppm de iones Cl^- , pues los concretos con menor relación a/c presentan potenciales más positivos que los concretos con mayor relación a/c, a igualdad de edades. La tendencia de los especímenes en contacto con la solución salina de 45000 ppm de iones Cl^- , es hacerse más negativos después de llegar a -200 mV, cerca de los 28 días de colado, al igual que los especímenes sumergidos en las otras dos soluciones salinas. Los especímenes que registraron el potencial de corrosión más positivo son los que tienen relaciones a/c más bajas, lo que indica que a menor relación a/c, mejor comportamiento en su potencial de corrosión.

La velocidad de corrosión en promedio a las 2 horas de colado presentaron una velocidad de corrosión de $6.0 \mu\text{m/año}$, catalogada ésta, como moderada; la tendencia en todos los concretos de esta comparativa es bajar la velocidad de corrosión dentro de las primeras 100 horas hasta cerca de $2.0 \mu\text{m/año}$ catalogando esta velocidad de corrosión como baja; en promedio, cerca de las 500 horas de colado, las velocidades de corrosión bajan a menos de $1 \mu\text{m/año}$, pasando a una velocidad de corrosión muy baja y todas las mediciones de estos concretos registraron cerca de $0.65 \mu\text{m/año}$ en promedio. Después de 600 horas de ensayo, el comportamiento observado en todos los especímenes fue igual al antes descrito en todos estos concretos de la comparativa 3, sin notar cambios cuando los especímenes entraron en contacto con las soluciones salinas.

En la comparativa 3, se puede observar que la resistividad en un principio se comporta de manera normal, como lo es en los concretos convencionales, con resistividad muy baja en las primeras horas después del colado y al pasar las primeras 24 horas de registros, la resistividad crece de forma continua. La gráfica 21, presenta una resistividad peculiar, pues se observa que el concreto MT1 presenta mejores mediciones que los concretos MT3 y MT4, que

presentan resistividades muy similares e inferiores a la del concreto MT1, sin embargo, en las gráficas 24 y 27 la resistividad es similar en todos los concretos hasta cerca de las 1000 horas, con una velocidad de corrosión alta en la mayoría de los especímenes y a partir de ese tiempo es cuando la resistividad de estos concretos empieza a mostrar diferencias; lo que se puede notar de manera sobresaliente es que el concreto con menor relación a/c, el MT1, presenta el mejor desempeño en la prueba de resistividad y los otros dos concretos presentan tendencias dispersas, el concreto MT4 con relación a/c de 0.6 tiende a ser más resistivo que el concreto MT3 con relación a/c de 0.5. Después de sumergir estos concretos en las soluciones salinas no se pueden notar cambios significativos en el comportamiento de su resistividad, al menos durante el tiempo de registro de su desempeño.

Imagen 3, especímenes del concreto MT3, antes de realizar las pruebas electroquímicas.

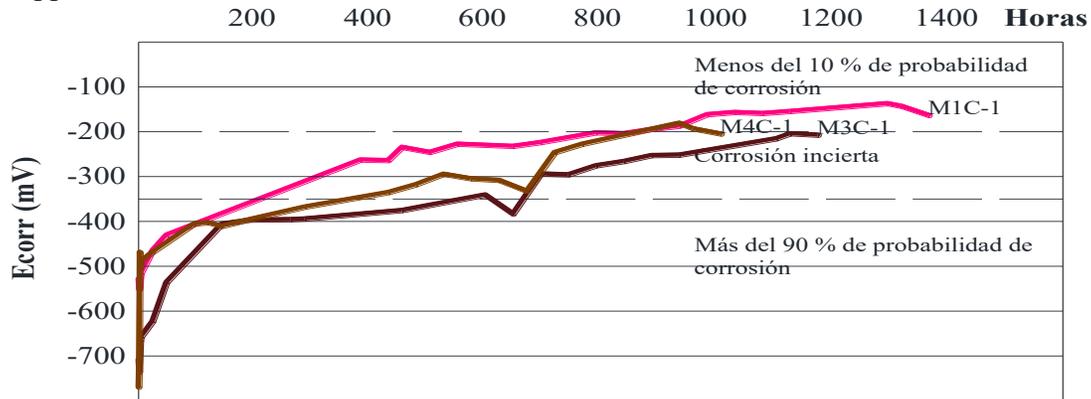


Imagen 4, especímenes del concreto MT4, sumergidas en la solución salina de 15000 ppm de iones Cl⁻.

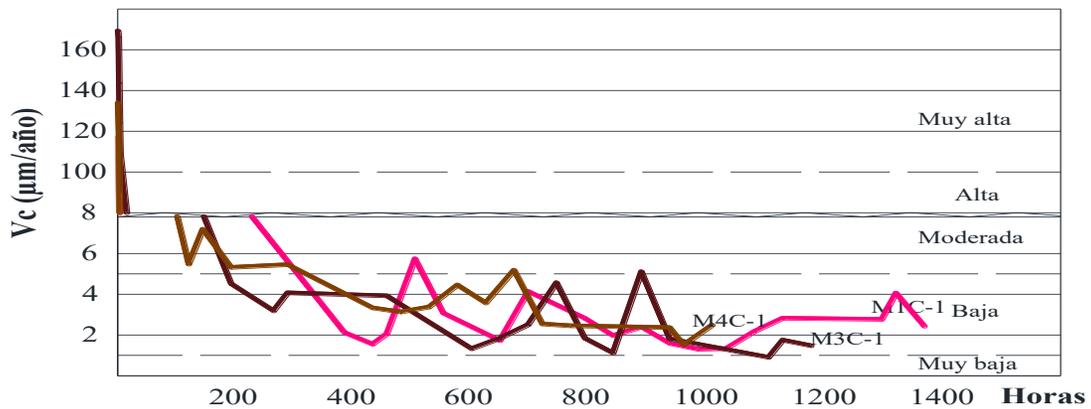


Resultados de la comparativa 4.

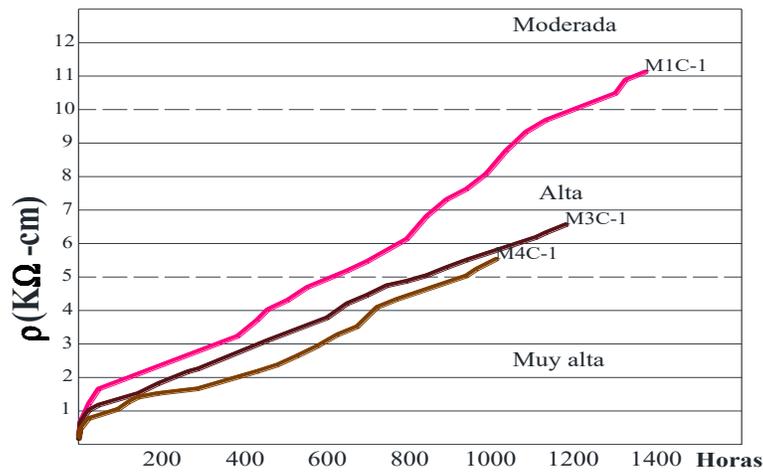
En las gráficas 28, 29 y 30, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos M1C-1, M3C-1 y M4C-1, sumergidos en solución de cloruros de 5000 ppm.



Gráfica 28. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos M1C-1, M3C-1 y M4C-1.

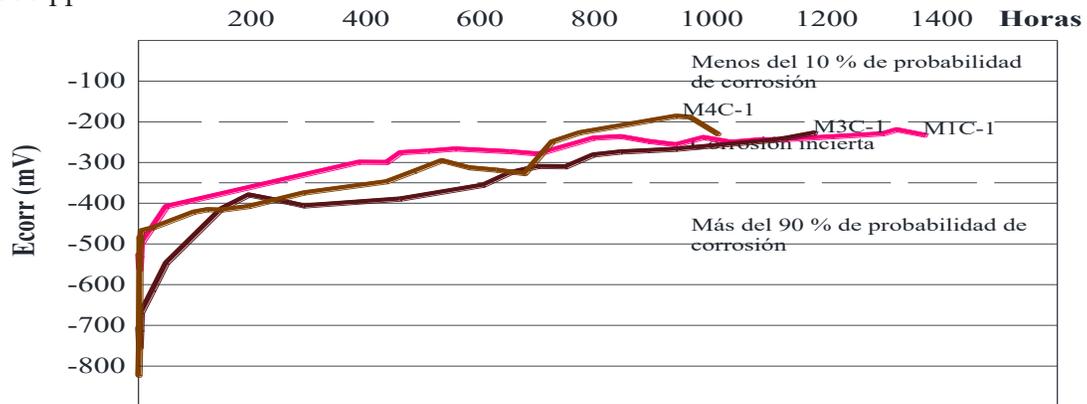


Gráfica 29. Velocidad de corrosión en $\mu\text{m/año}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos M1C-1, M3C-1 y M4C-1.

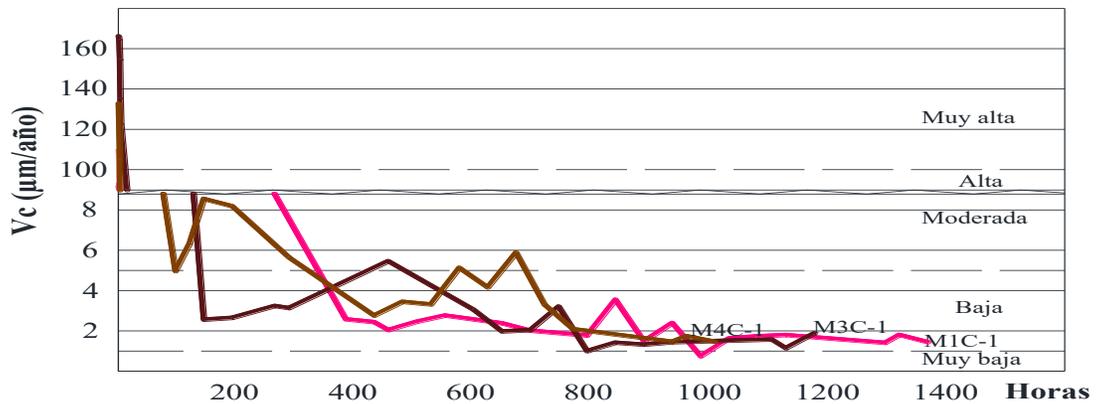


Gráfica 30. Resistividad en $\text{K}\Omega\text{-cm}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos M1C-1, M3C-1 y M4C-1.

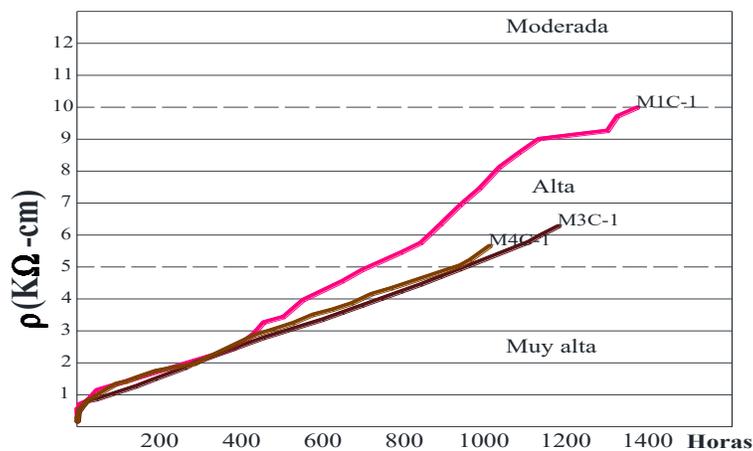
En las gráficas 31, 32 y 33, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos M1C-1, M3C-1 y M4C-1, sumergidos en solución de cloruros de 15000 ppm.



Gráfica 31. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos M1C-1, M3C-1 y M4C-1.

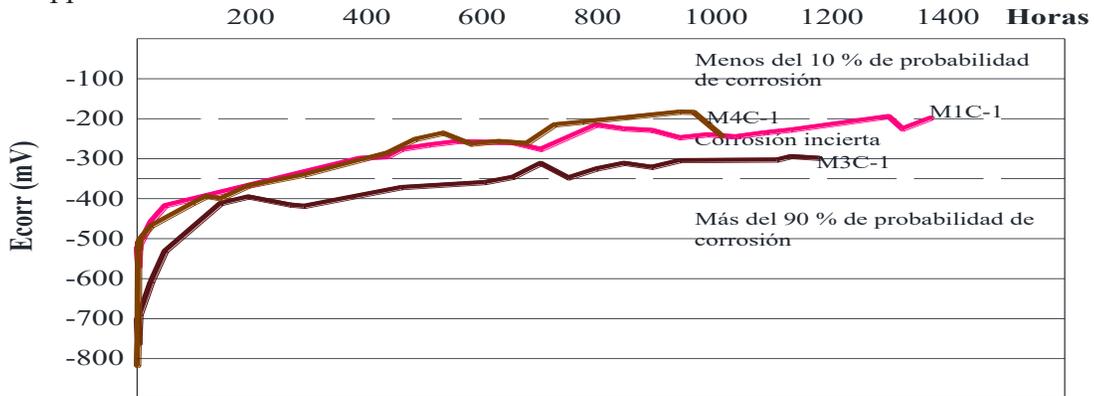


Gráfica 32. Velocidad de corrosión en $\mu\text{m/año}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos M1C-1, M3C-1 y M4C-1.

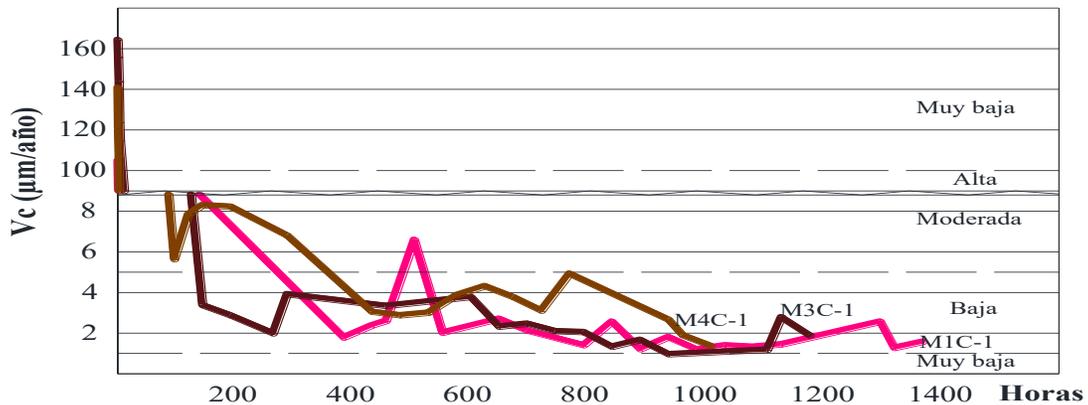


Gráfica 33. Resistividad en $\text{K}\Omega\text{-cm}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos M1C-1, M3C-1 y M4C-1.

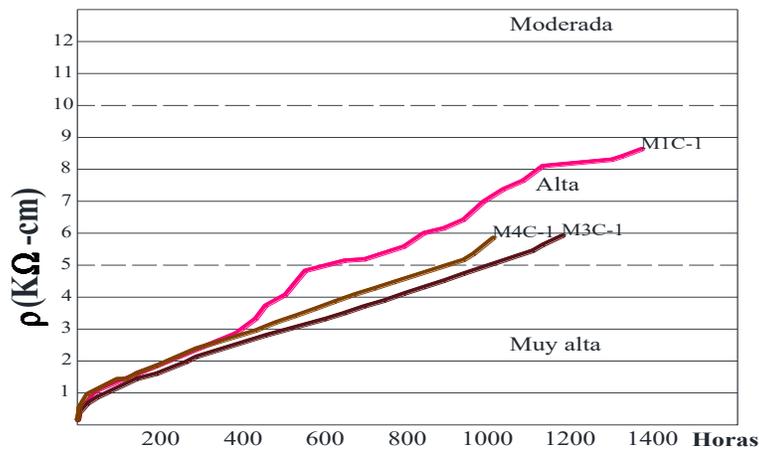
En las gráficas 34, 35 y 36, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos M1C-1, M3C-1 y M4C-1, sumergidos en solución de cloruros de 45000 ppm.



Gráfica 34. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos M1C-1, M3C-1 y M4C-1.



Gráfica 35. Velocidad de corrosión en $\mu\text{m/año}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos M1C-1, M3C-1 y M4C-1.



Gráfica 36. Resistividad en $\text{K}\Omega\text{-cm}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos M1C-1, M3C-1 y M4C-1.

Con la comparativa 4 se trata de ver la influencia de la relación a/c en las mezclas que incluyen cloruros, los concretos M1C-1, M3C-1 Y M4C-1, en sus primeras mediciones presentaron potenciales de corrosión en promedio de -750 mV, con una tendencia a hacerse más positivos, teniendo un crecimiento sostenido hasta llegar cerca de los -250 a los 28 días de edad o 672 horas aproximadamente, que es cuando se sumergen en las soluciones salinas. Los especímenes que estuvieron en contacto con la solución salina de 5000 ppm de iones Cl^- , presentan mejoras en su potencial de corrosión, después ser sumergidos en esta solución, las mediciones de potencial son cada vez más positivas, lo que indica que estos concretos bajo esta solución salina mejora sus condiciones a corto plazo. Los especímenes en contacto con la solución salina de 15000 ppm de iones Cl^- , presentan mediciones de potencial cercanas a -200 mV, lo que indica que el concreto tiende a tener menos del 10% de probabilidad de corrosión en el acero de refuerzo con una leve tendencia a reportar mediciones más negativas y cayendo a la zona de corrosión incierta. En el caso de los especímenes que entraron en contacto con la solución salina de 45000 ppm de iones Cl^- , su comportamiento en las mediciones de potencial de corrosión es permanecer cerca de -250 mV, indicando que se encuentra en la zona de corrosión incierta, con una ligera tendencia a seguir registrando potenciales de corrosión más negativos. Como se puede observar en las gráficas 28, 31 y 34, los concretos contaminados con iones Cl^- , presentan potenciales que no están de acuerdo con la relación a/c, pues el concreto M4C-1 presenta potenciales más positivos que el concreto M3C-1, lo que podría interpretarse como que el concreto con relación a/c de 0.6 tienen mejor comportamiento que el concreto con relación a/c de 0.5, sin embargo, debemos tomar en cuenta los demás parámetros de las pruebas electroquímicas.

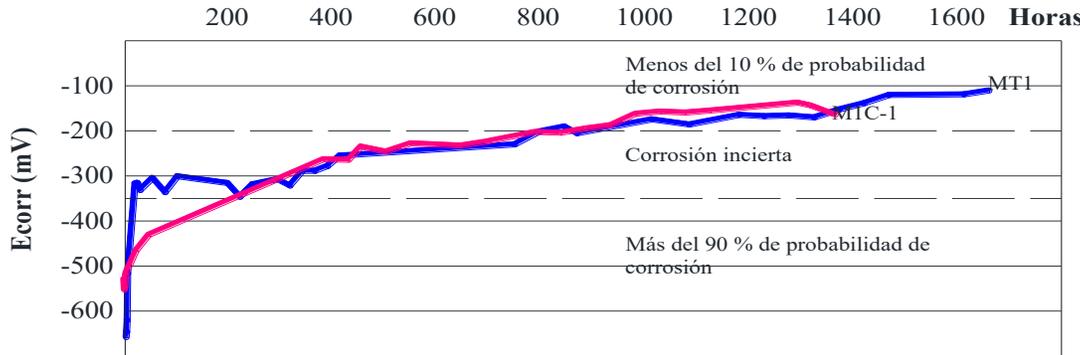
La velocidad de corrosión promedio en la primera medición de estos concretos fue de 125 $\mu\text{m}/\text{año}$, considerando esta velocidad de corrosión como muy alta, con la tendencia a bajar hasta cerca de 4.0 $\mu\text{m}/\text{año}$ dentro de las primeras 300 horas después del colado, categorizando esta velocidad de corrosión como baja. Después la tendencia de la velocidad de corrosión es seguir bajando hasta cerca de 2.0 $\mu\text{m}/\text{año}$, cerca de las 1000 horas de registros de la velocidad de corrosión; sin embargo, los registros después este tiempo muestran que la velocidad de corrosión se mantiene por arriba de 2.0 $\mu\text{m}/\text{año}$, y también se observa que sumergir los especímenes de estos concretos a los 28 días después del colado, en las soluciones salinas no se altera su desempeño.

La resistividad en estos concretos es baja en las primeras horas de registro, lo que indica que probablemente la corrosión en estos concretos es muy alta según la tabla 3. En estos concretos contaminados con cloruros se puede notar que el concreto M1C-1, con relación a/c de 0.4, tiende a registrar mayor resistividad en todo el tiempo del ensaye que los concretos M3C-1 y M4C-1, de relaciones a/c de 0.5 y 0.6, respectivamente; sin embargo en estos últimos concretos después de cerca de las primeras 450 horas, el concreto M4C-1 presenta mejores registros de resistividad que el concreto M3C-1, siendo esta peculiaridad un dato

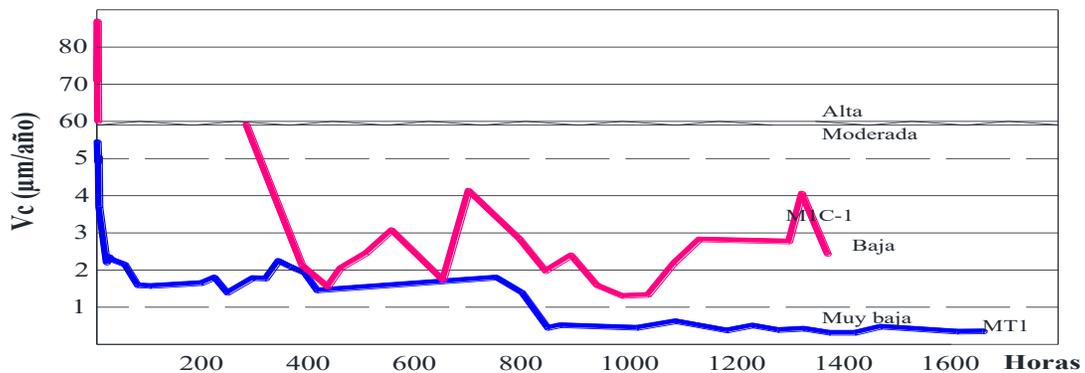
importante en esta prueba. En estos concretos no se presentaron cambios significativos después de que sus respectivos especímenes fueran sumergidos en las soluciones salinas.

Resultados del Grupo 5.

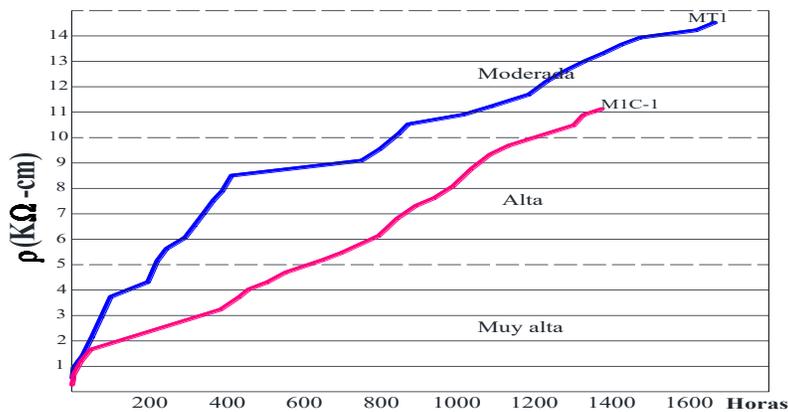
En las gráficas 37, 38 y 39, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT1 y M1C-1, sumergidos en solución de cloruros de 5000 ppm.



Gráfica 37. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT1 y M1C-1.

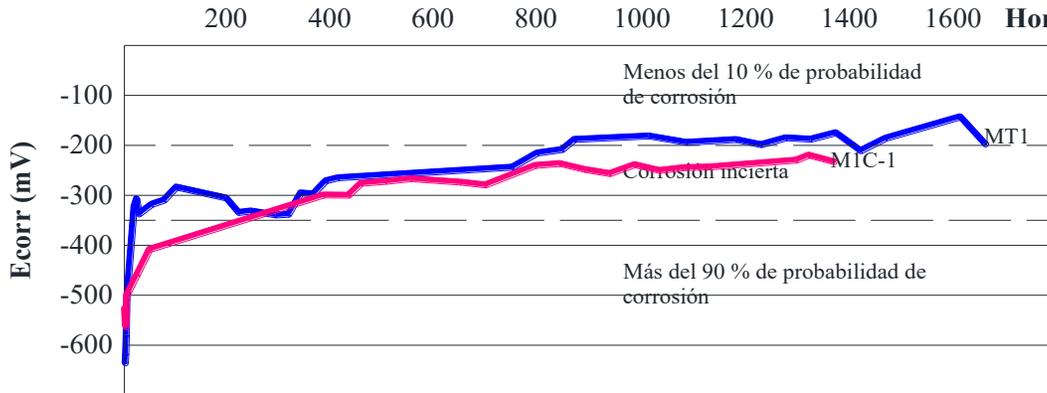


Gráfica 38. Velocidad de corrosión en µm/año contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT1 y M1C-1.

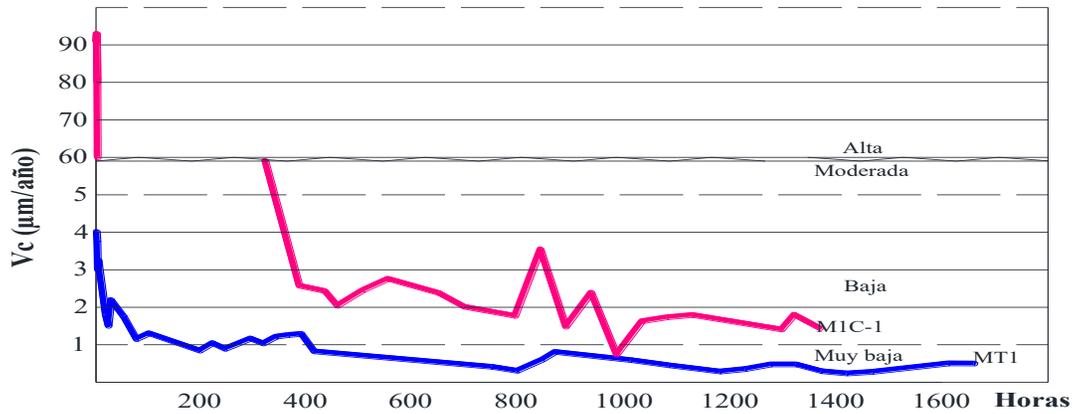


Gráfica 39. Resistividad en KΩ-cm contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT1 y M1C-1.

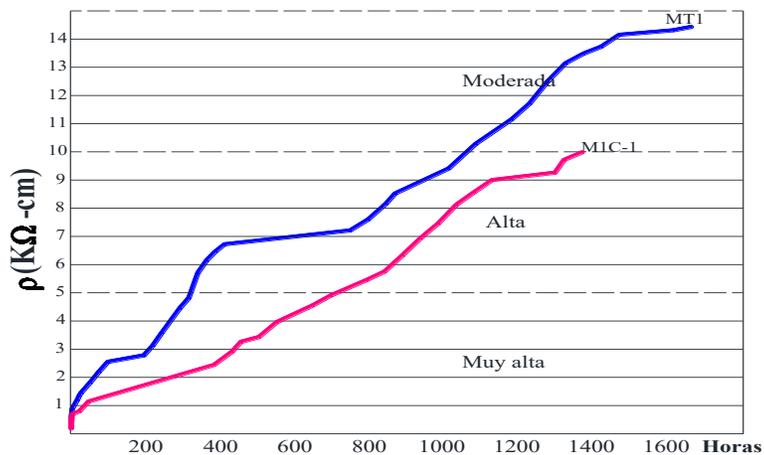
En las gráficas 40, 41 y 42, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT1 y M1C-1, sumergidos en solución de cloruros de 15000 ppm.



Gráfica 40. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT1 y M1C-1.

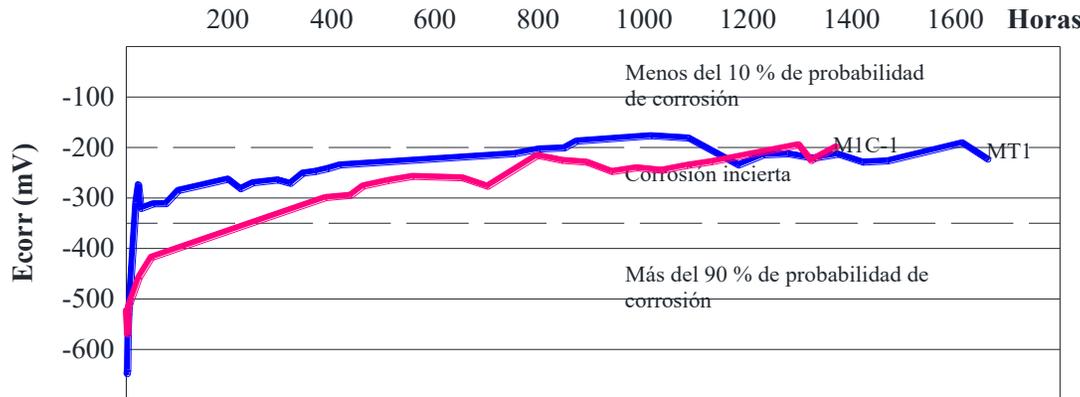


Gráfica 41. Velocidad de corrosión en $\mu\text{m}/\text{año}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT1 y M1C-1.

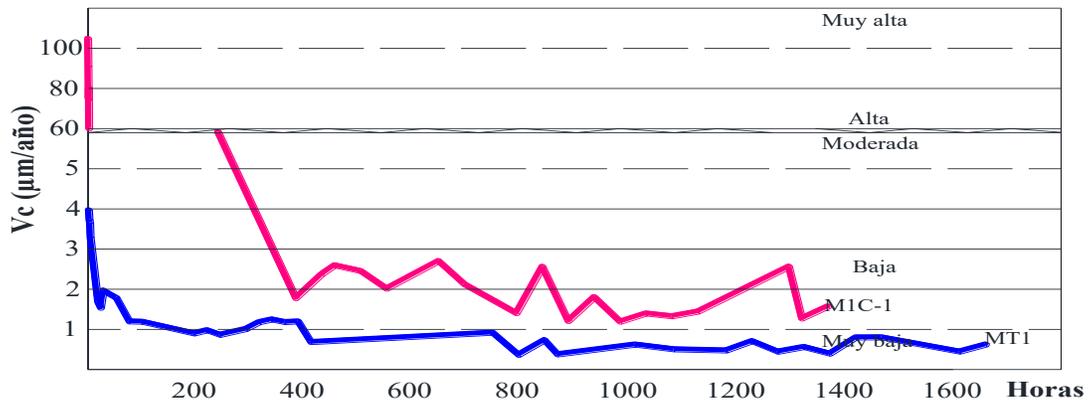


Gráfica 42. Resistividad en $\text{K}\Omega\text{-cm}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT1 y M1C-1.

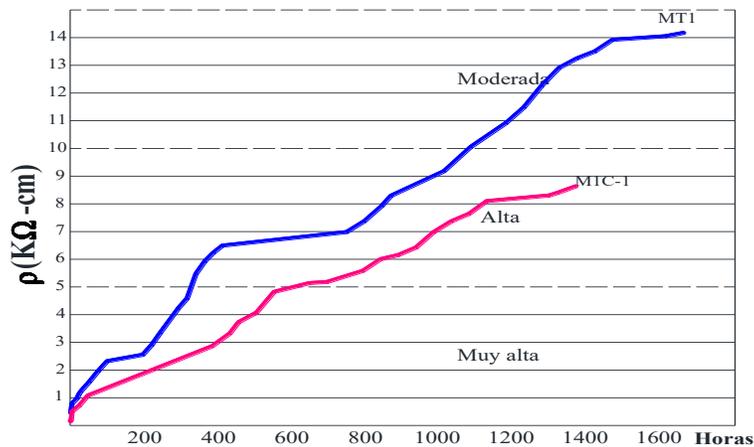
En las gráficas 43, 44 y 45, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT1 y M1C-1, sumergidos en solución de cloruros de 45000 ppm.



Gráfica 43. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT1 y M1C-1.



Gráfica 44. Velocidad de corrosión en µm/año contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT1 y M1C-1.



Gráfica 45. Resistividad en KΩ-cm contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT1 y M1C-1.

Las comparativas 5, 6, 7 y 8 tienen como fin ver la influencia de la presencia de cloruros en proporción de 1% de la masa de cemento en la corrosión del acero de refuerzo. También permite determinar el efecto que tiene la presencia de cloruros en distintas concentraciones en el medio externo.

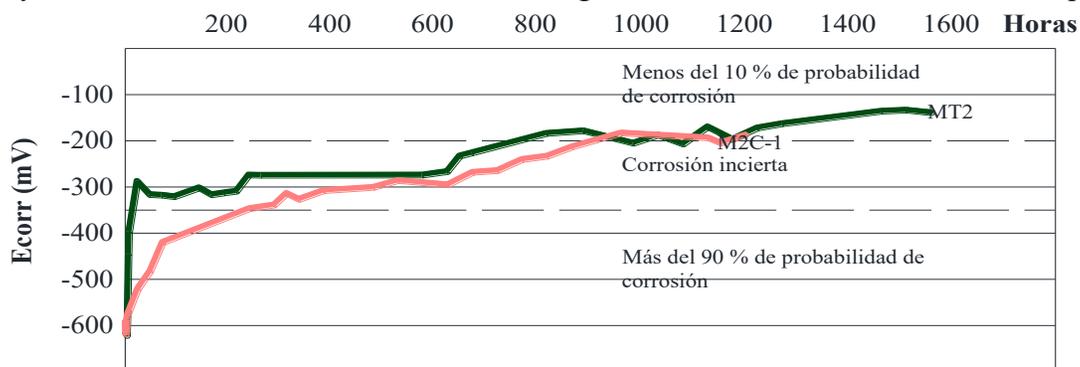
La comparativa 5 integrada por los concretos MT1 y M1C-1, presentan diferencias en sus potenciales de corrosión, pues el concreto MT1 tiene un comportamiento típico de un concreto de buena calidad, en contra parte el concreto M1C-1, tiene un comportamiento durante las primeras 300 horas muy diferente al concreto MT1, lo que es de esperarse por la presencia de cloruros, sin embargo, después de las primeras 300 horas el comportamiento del potencial de corrosión fueron similares. En los especímenes que entraron en contacto con la solución salina de 5000 ppm de iones Cl^- , después de las 300 horas de mediciones el comportamiento en el potencial de corrosión es muy parecido entre estos dos concretos y con la misma tendencia de las mediciones de sus potenciales de corrosión, que es hacerse más positivos después de ser sumergidos en la solución salina, cerca de 672 horas después de su colado. El caso de los concretos en contacto con la solución salina de 15000 ppm de iones Cl^- , después de las primeras 300 horas presentaron mediciones de potencial de corrosión con la misma tendencia, pero con la diferencia de que el concreto MT1 presentó valores más positivos que el concreto M1C-1 y cuando estos especímenes entran en contacto con la solución la tendencia cambia, pues el concreto MT1 sigue su tendencia a registrar mediciones de potencial de corrosión más positivos cerca de -200 mV, por el contrario el concreto M1C-1 al entrar en contacto con la solución salina, el comportamiento del potencial de corrosión es permanecer cerca de los -250 mV. Con los especímenes sumergidos en la solución salina de 45000 ppm de iones Cl^- , el potencial de corrosión en el concreto M1C-1 presenta potenciales de corrosión más bajos que el concreto MT1 antes de 672 horas de su colado, hasta cerca de las primeras 800 horas de registro, cuando presentaron potenciales de corrosión similares y después cambiaron tendencias, con el concreto MT1 presentando potenciales más positivos y el concreto M1C-1 presentando potenciales más negativos, sin embargo, cerca de las 1200 horas de registro volvieron a presentar potenciales similares.

La velocidad de corrosión de estos concretos, registraron mediciones promedio de 4.5 $\mu\text{m}/\text{año}$ en el concreto MT1 y 89.0 $\mu\text{m}/\text{año}$ para el concreto M1C-1 en las primeras horas después del colado, lo que muestra diferencias notables en la velocidad de corrosión de cada uno de estos concretos hasta cerca de las 400 horas del colado. Después de ese tiempo las velocidades de corrosión se acercan a 2.0 $\mu\text{m}/\text{año}$, con la diferencia de que el concreto M1C-1 se mantiene dentro de la zona de baja velocidad de corrosión, con mediciones en promedio de 2.0 $\mu\text{m}/\text{año}$ y el concreto MT1 muestra una tendencia a reducir la velocidad de corrosión hasta llegar a la zona de muy baja velocidad de corrosión, con mediciones cercanas a 0.6 $\mu\text{m}/\text{año}$. Sin embargo, no se muestran cambios considerables en estos concretos después de que sus especímenes fueron sumergidos en las soluciones salinas.

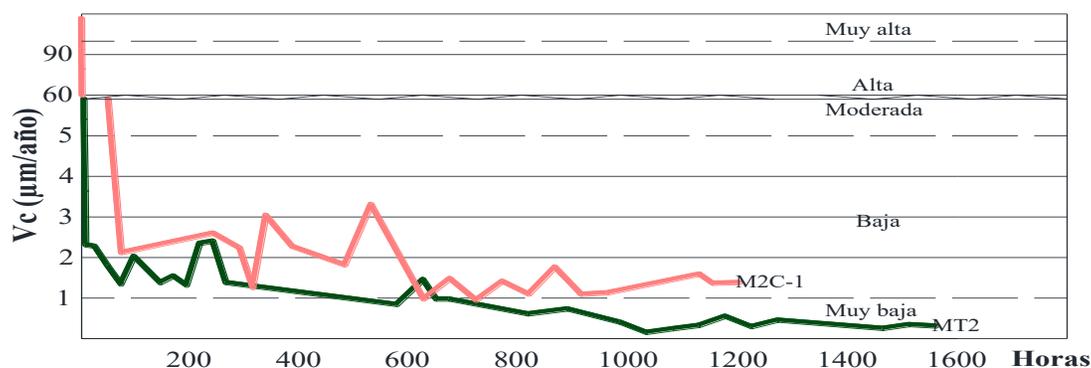
La resistividad, es muy diferente en estos dos concretos, lo que se atribuye a que el concreto, MIC-1, presenta una mejor conductividad en el sistema acero-concreto; lo que se nota en las gráficas 39, 42 y 45, la resistividad de este concreto es muy inferior al concreto MT1.

Resultados de la comparativa 6.

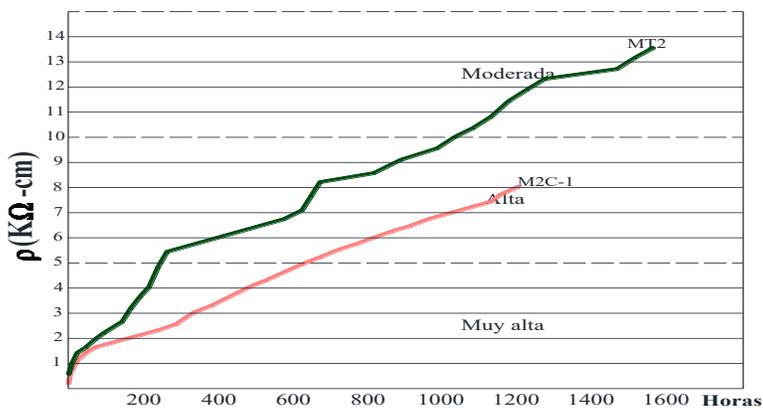
En las gráficas 46, 47 y 48, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT2 Y M2C-1, sumergidos en solución de cloruros de 5000 ppm.



Gráfica 46. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT2 Y M2C-1.

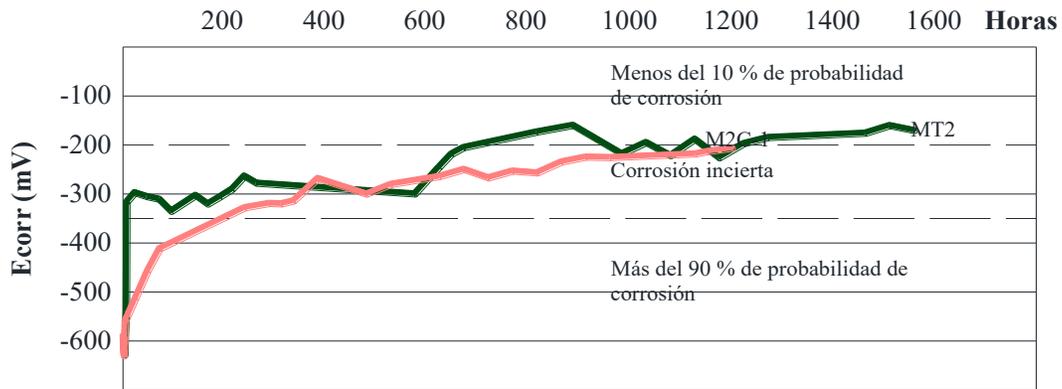


Gráfica 47. Velocidad de corrosión en $\mu\text{m/año}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT2 Y M2C-1.

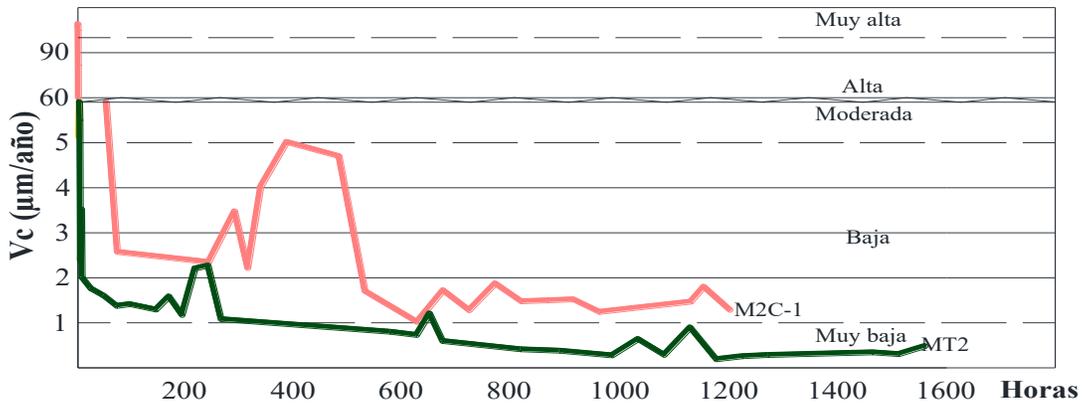


Gráfica 48. Resistividad en $\text{K}\Omega\text{-cm}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT2 Y M2C-1.

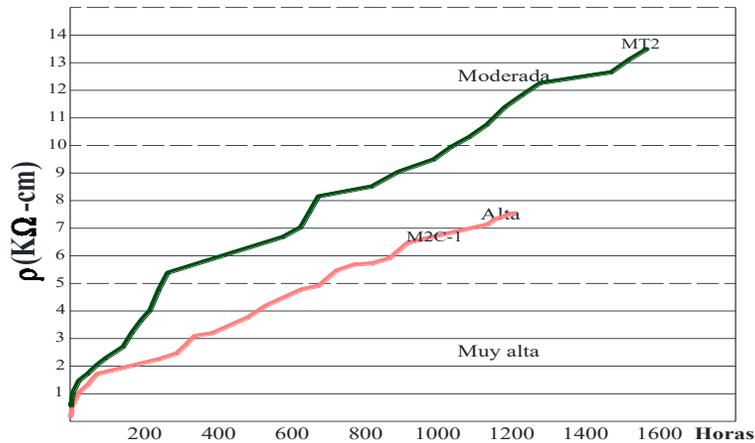
En las gráficas 49, 50 y 51, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT2 Y M2C-1, sumergidos en solución de cloruros de 15000 ppm.



Gráfica 49. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT2 Y M2C-1.

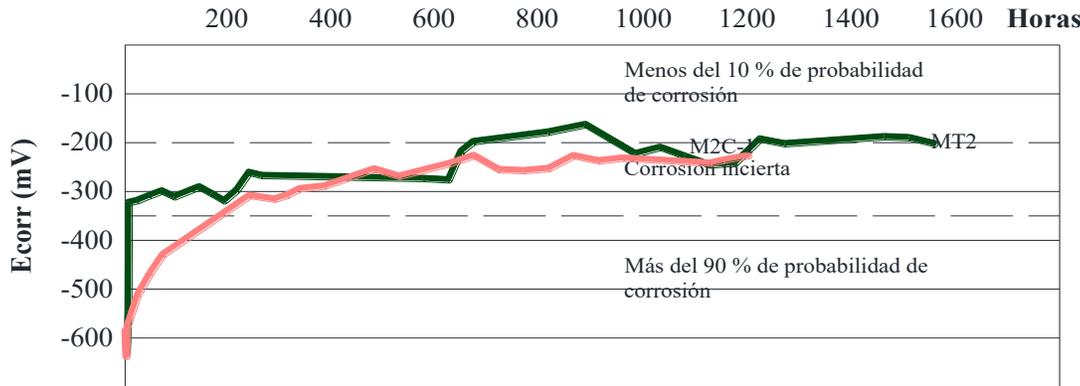


Gráfica 50. Velocidad de corrosión en $\mu\text{m/año}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT2 Y M2C-1.

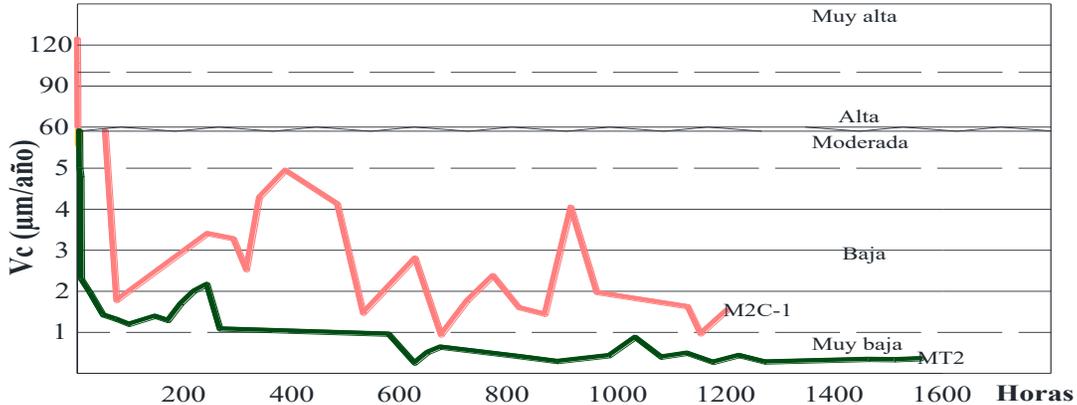


Gráfica 51. Resistividad en $\text{K}\Omega\text{-cm}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT2 Y M2C-1.

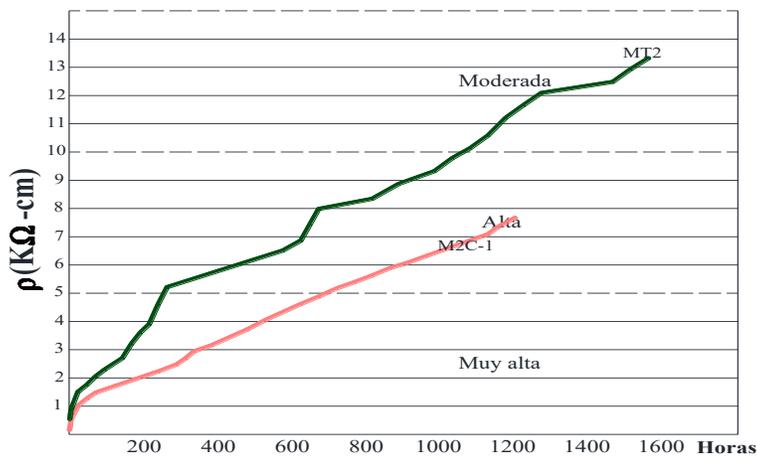
En las gráficas 52, 53 y 54, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT2 Y M2C-1, sumergidos en solución de cloruros de 45000 ppm.



Gráfica 52. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT2 Y M2C-1.



Gráfica 53. Velocidad de corrosión en µm/año contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT2 Y M2C-1.



Gráfica 54. Resistividad en KΩ-cm contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT2 Y M2C-1.

En la comparativa 6 integrada por los concretos MT2 y M2C-1 se muestra el efecto de los cloruros incluidos en las mezclas de concreto que además tienen humo de sílice. El comportamiento del potencial de corrosión durante las primeras 500 horas tiene diferencias notables, pues el concreto MT2 presenta potenciales de corrosión normales para un concreto de buena calidad y el concreto M2C-1 presenta potenciales de corrosión más negativos con la tendencia a hacerse positivos, pero con una tendencia más lenta que la de los especímenes del concreto MT2. En los especímenes 1, 2 y 3, de estos concretos, después de las primeras 500 horas de su colado, el potencial de corrosión tiene la misma tendencia en ambos concretos, pero con la diferencia de que los especímenes del concreto MT2 registraron potenciales más positivos que los especímenes del concreto M2C-2, aun después de entrar en contacto con la solución salina de 5000 ppm de iones Cl^- ; después de aproximadamente 900 horas el comportamiento es similar y se hacen más positivos cerca de las 1000 horas. Los especímenes que entraron en contacto con las soluciones salinas de 15000 ppm de iones Cl^- , tuvieron variaciones entre las 500 horas y 1000 horas, para después permanecer cerca de -200 mV de las 1000 horas en adelante. Los especímenes en contacto con la solución salina de 45000 ppm de iones Cl^- , tuvieron la misma tendencia que los especímenes que estuvieron en contacto con la solución salina de 15000 ppm de iones Cl^- , hasta las 1000 horas de registros, después se registraron potenciales de corrosión más negativos.

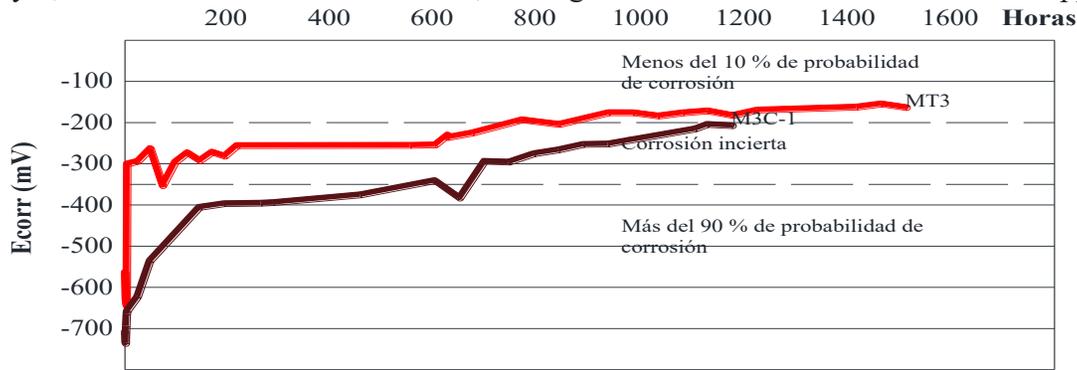
Las primeras mediciones de la velocidad de corrosión de esta comparativa, registraron en promedio $5.7 \mu\text{m/año}$ para el concreto MT2 y para el concreto M2C-1 en promedio registraron velocidades de corrosión de $117.0 \mu\text{m/año}$, lo que hace que estos concretos sean considerados en diferentes categorías de corrosión, pues en las primeras horas de medición el concreto MT2 está dentro de la zona de velocidad moderada de corrosión y el concreto M2C-1 estaría dentro de la zona de muy alta velocidad de corrosión, con la tendencia de ambos concretos a bajar la velocidad de corrosión, hasta llegar a $2.0 \mu\text{m/año}$ en promedio para ambos concretos cerca de las 70 horas después del colado. Después de este tiempo, la tendencia de los concretos es diferente; el concreto M2C-1 muestra variaciones notables dentro de las siguientes horas para después estabilizarse cerca de los $2.2 \mu\text{m/año}$ aproximadamente de las 700 horas en adelante. En el caso del concreto MT2, la tendencia de la velocidad de corrosión después de las primeras 70 horas del colado, es seguir bajando poco a poco hasta llegar a un promedio de $0.4 \mu\text{m/año}$ alrededor de las 1200 horas, manteniendo esta tendencia en las siguientes mediciones. En las mediciones de la velocidad de corrosión de estos concretos no se registraron mediciones que indiquen una variación importante en los especímenes sumergidos en las soluciones salinas.

En esta comparativa se presentan diferencias notables en los registros de la resistividad; el concreto MT2 presenta registros de resistividad típicos de concretos de buena calidad, llegando a una resistividad de $8.5 \text{ K}\Omega\cdot\text{cm}$ en promedio con una velocidad de corrosión alta, cerca de las 700 horas. El concreto M2C-1 a las mismas 700 horas presenta una resistividad de $5.0 \text{ K}\Omega\cdot\text{cm}$ en promedio con una velocidad de corrosión muy alta. Estos concretos no

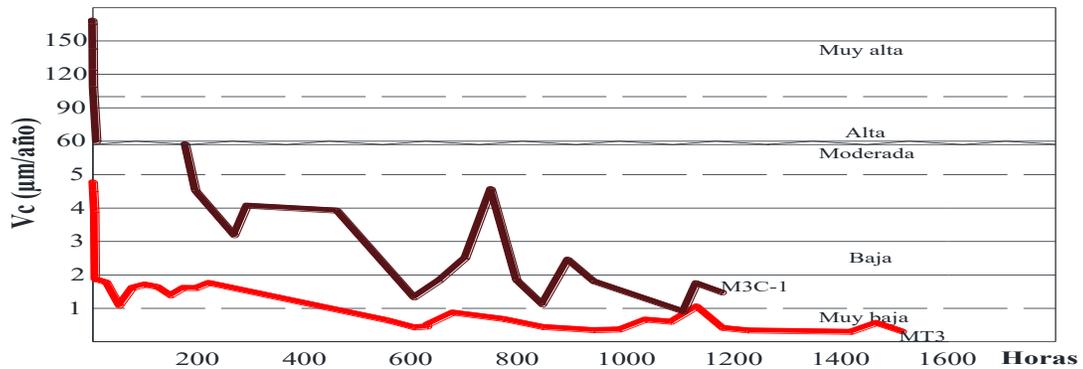
muestran en sus registros de resistividad una variación notable después que sus especímenes fueron sumergidos en las soluciones salinas.

Resultados de la comparativa 7.

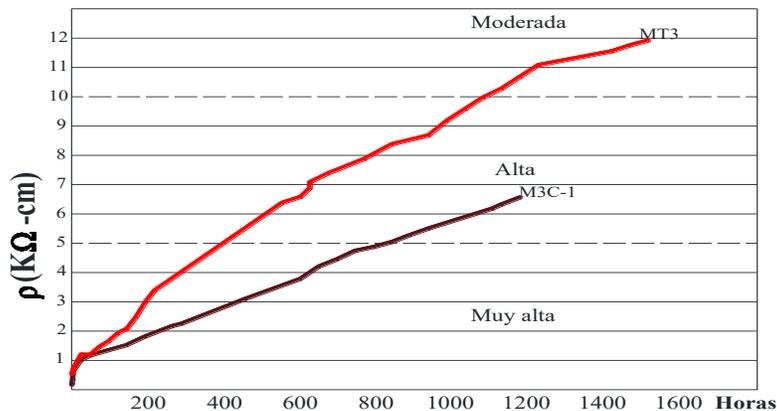
En las gráficas 55, 56 y 57, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT3 Y M3C-1, sumergidos en solución de cloruros de 5000 ppm.



Gráfica 55. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT3 Y M3C-1.

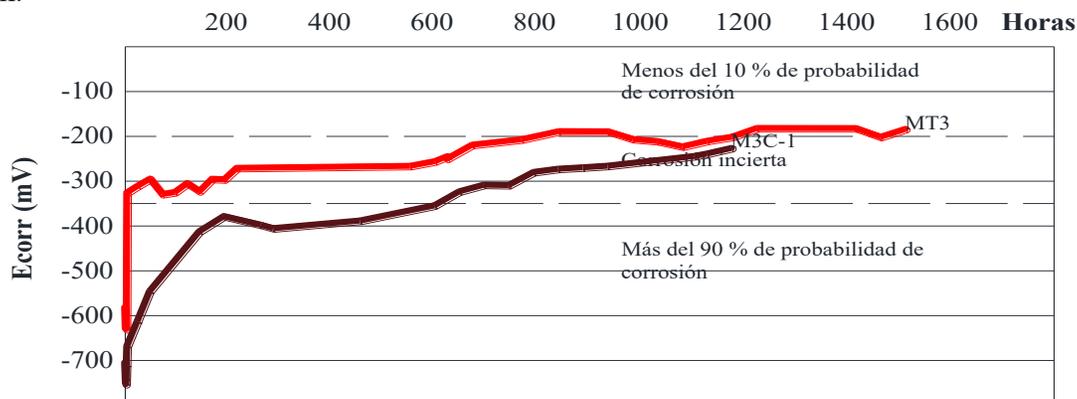


Gráfica 56. Velocidad de corrosión en µm/año contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT3 Y M3C-1.

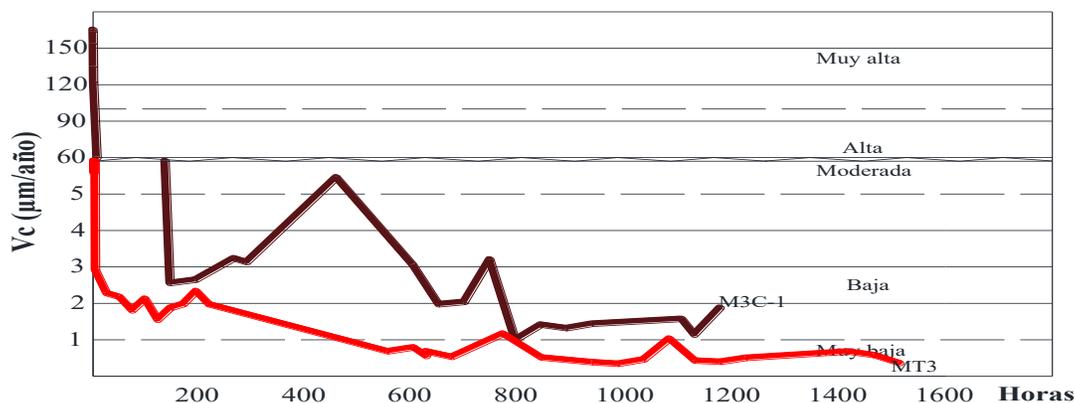


Gráfica 57. Resistividad en KΩ-cm contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT3 Y M3C-1.

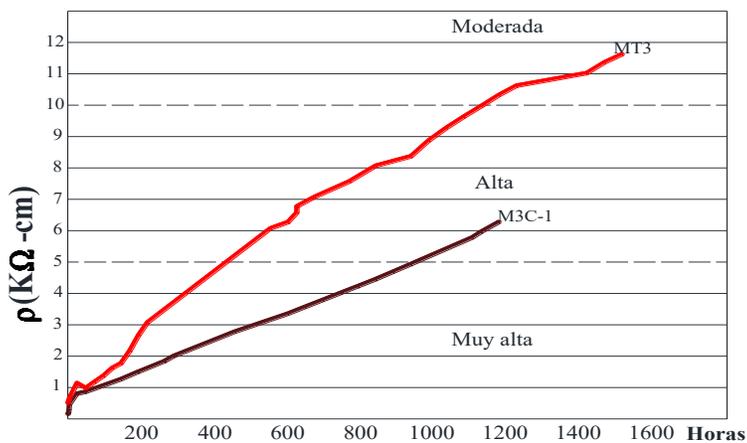
En las gráficas 58, 59 y 60, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 4, 5 y 6, con relación a/c=0.5, 1% de cloruros y sumergidos en solución de cloruros de 15000 ppm.



Gráfica 58. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT3 Y M3C-1.

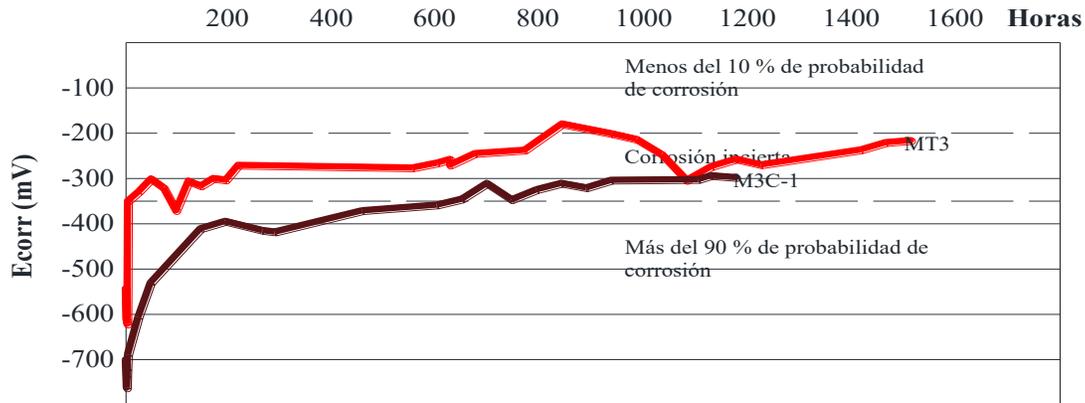


Gráfica 59. Velocidad de corrosión en $\mu\text{m/año}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT3 Y M3C-1.

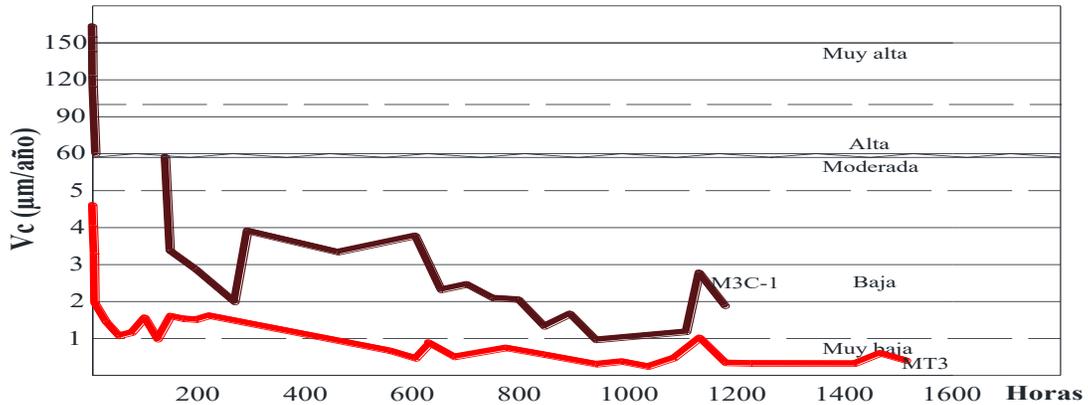


Gráfica 60. Resistividad en $\text{K}\Omega\text{-cm}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT3 Y M3C-1.

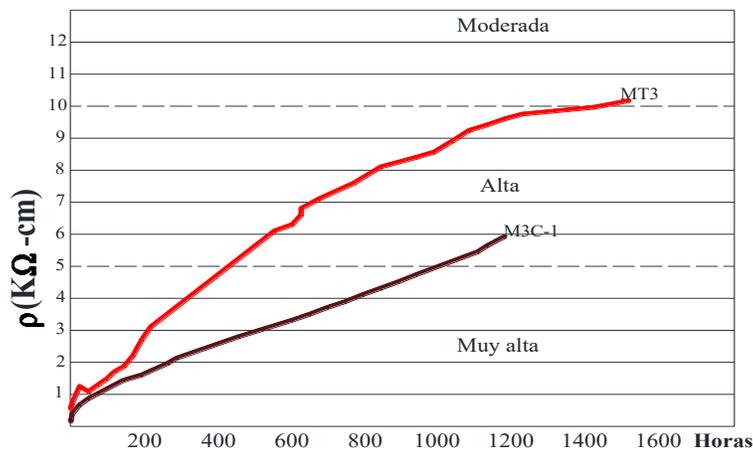
En las gráficas 61, 62 y 63, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT3 Y M3C-1, sumergidos en solución de cloruros de 45000 ppm.



Gráfica 61. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT3 Y M3C-1.



Gráfica 62. Velocidad de corrosión en $\mu\text{m}/\text{año}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT3 Y M3C-1.



Gráfica 63. Resistividad en $\text{K}\Omega\text{-cm}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT3 Y M3C-1.

En la comparativa 7 integrada por los concretos MT3 y M3C-1, se comparan mezclas con relación a/c de 0.5 para ver el efecto de la incorporación de cloruros en la mezcla, imágenes 5 y 6. Las diferencias observadas en los registros de potencial de corrosión; el concreto MT3 tiene un comportamiento en los registros de su potencial de corrosión típicos de un concreto normal hasta las primeras 700 horas. En el concreto M3C-1, la tendencia del potencial de corrosión durante las primeras 700 horas, es la misma que la de los concretos analizados anteriormente contaminados con cloruros, presenta registros de potenciales de corrosión más negativos que el concreto MT3 pero con tendencia a hacerse positivos. En los especímenes que entraron en contacto con la solución salina de 5000 ppm, después de las primeras 700 horas aproximadamente, los registros del potencial de corrosión tienden a hacerse más positivos, tanto los del concreto MT3 como los especímenes del concreto M3C-1, con la diferencia de que el concreto M3C-1 nunca llega a igualar las mediciones de potencial de corrosión del concreto MT3, a igualdad tiempo de registro. En los especímenes sumergidos en la solución de 15000 ppm de iones Cl^- , se observa que el comportamiento del potencial de corrosión del concreto MT3 permanece cerca de -200 mV, mientras que el concreto M3C-1, tiende a acercarse a -200 mV siempre un poco más negativos, aunque cercanos a los registrados por el concreto MT3. En los especímenes sumergidos en la solución salina de 45000 ppm de iones Cl^- , el comportamiento del potencial de corrosión del concreto MT3 es similar a los otros especímenes sumergidos en las otras soluciones salinas hasta aproximadamente 900 horas después del colado, pero a partir de estas primeras horas el potencial de corrosión tiende a hacerse más negativo, presumiblemente por la afectación de los iones Cl^- disueltos en la solución salina; en cuanto a los especímenes del concreto M3C-1, después de las primeras 700 horas del colado, el potencial de corrosión se mantiene cerca de los -300 mV indicando que este concreto está catalogado en la zona de corrosión incierta desde que entro en contacto con la solución salina.

La velocidad de corrosión en la comparativa 7, presentaron mediciones muy diferentes en las primeras horas de esta prueba; en el concreto MT3 en promedio fueron de $5.7 \mu\text{m/año}$ y en el concreto M3C-1 las velocidades de corrosión en promedio fueron de $166.4 \mu\text{m/año}$; con la tendencia de los dos concretos a reducir su velocidad de corrosión. En el caso del concreto MT3 la tendencia es reducir la velocidad de corrosión hasta cerca de $2.0 \mu\text{m/año}$ dentro de las primeras 24 horas después del colado de este concreto y posteriormente, es seguir bajando su velocidad paulatinamente hasta llegar aproximadamente a $0.3 \mu\text{m/año}$ a 1200 horas de ensaye, catalogándose en la zona de velocidad de corrosión muy baja. Para el concreto M3C-1, su velocidad de corrosión baja de manera significativa hasta llegar aproximadamente a $3.0 \mu\text{m/año}$ cerca de las primeras 200 horas de ensaye; después de estas primeras horas la velocidad de corrosión sigue bajando pero de manera más lenta hasta cerca de las 900 horas de ensayo cuando alcanza una velocidad de corrosión de aproximadamente $1.7 \mu\text{m/año}$, ubicando esta velocidad de corrosión como baja. Estos concretos no mostraron cambios importantes al sumergir sus respectivos especímenes en las diferentes soluciones salinas.

Los registros de la resistividad de los concretos son muy diferentes entre sí, tendiendo a subir las mediciones de la resistividad en ambos concretos, sin embargo, en el concreto M3C-1 la resistividad aumenta de manera menos significativa que el concreto MT3; cerca de las 1000 horas de ensaye, en el concreto MT3 se registra una resistividad de 8.5 K Ω .cm en promedio, en cambio en el concreto M3C-1 en promedio se registró 5.0 K Ω .cm a las mismas 1000 horas, lo que se interpreta como un concreto de buena calidad para el caso del MT3 y un concreto deficiente M3C-1. Estos concretos no presentamos cambios notables en sus registros de resistividad después de ser sumergidos en las soluciones salinas.

Imagen 5, especímenes del concreto MT3, antes de realizar las pruebas electroquímicas.

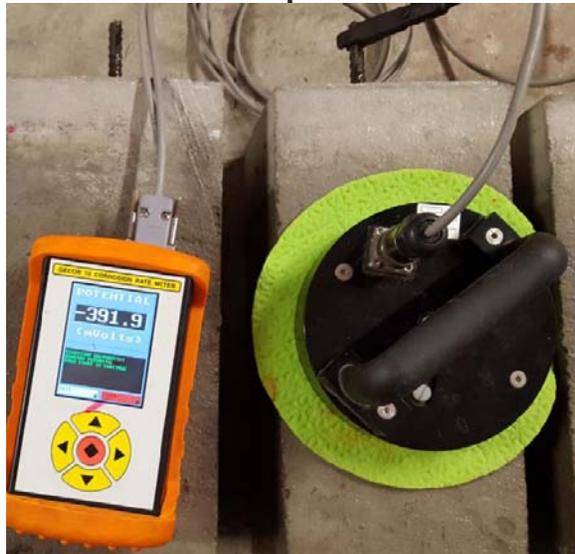


Imagen 6, especímenes del concreto M3C-1, sumergidas en la solución salina de 15000 ppm de iones Cl⁻.

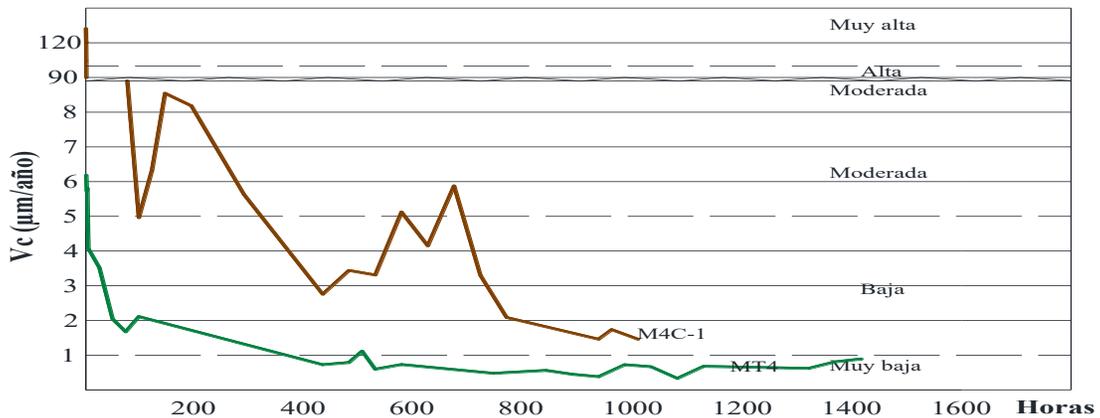


Resultados de la comparativa 8.

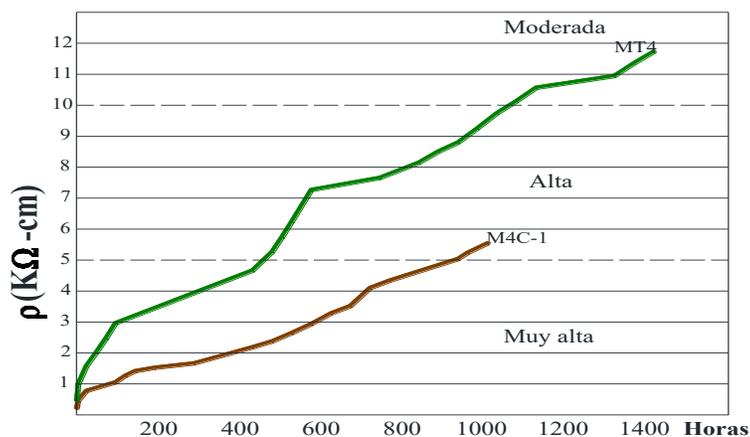
En las gráficas 64, 65 y 66, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT4 Y M4C-1, sumergidos en solución de cloruros de 5000 ppm.



Gráfica 64. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT4 Y M4C-1.

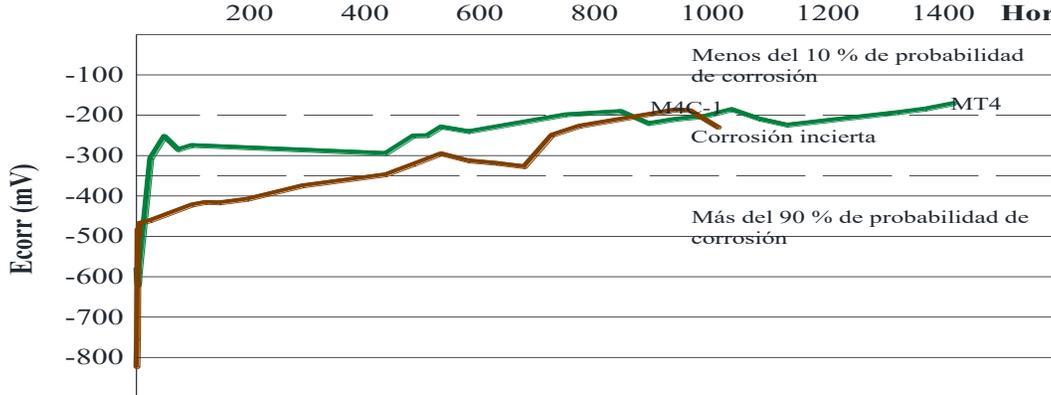


Gráfica 65. Velocidad de corrosión en µm/año contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3 de los concretos MT4 Y M4C-1.

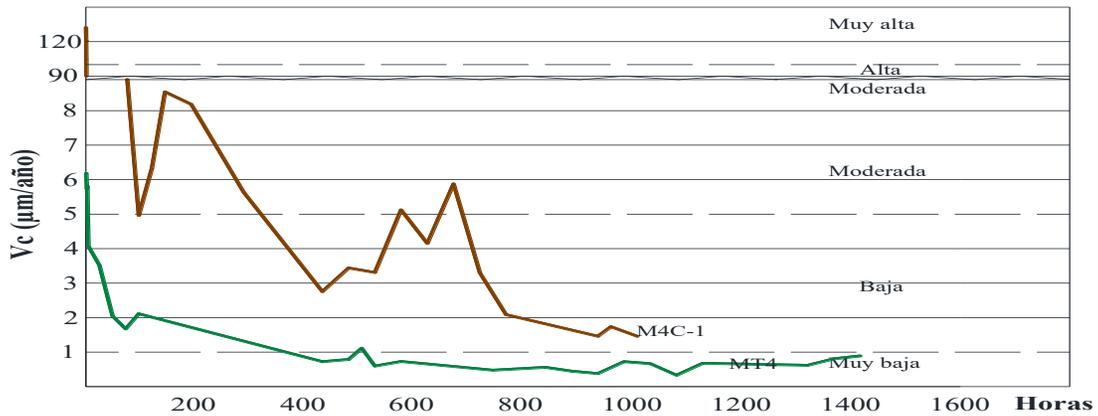


Gráfica 66. Resistividad en KΩ-cm contra el tiempo en horas, de los especímenes 1, 2 y 3, de los concretos MT4 Y M4C-1.

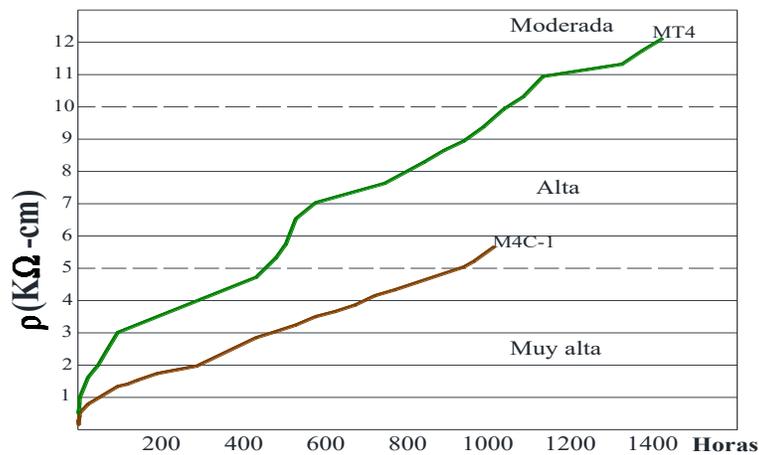
En las gráficas 67, 68 y 69, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT4 Y M4C-1, sumergidos en solución de cloruros de 15000 ppm.



Gráfica 67. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT4 Y M4C-1.

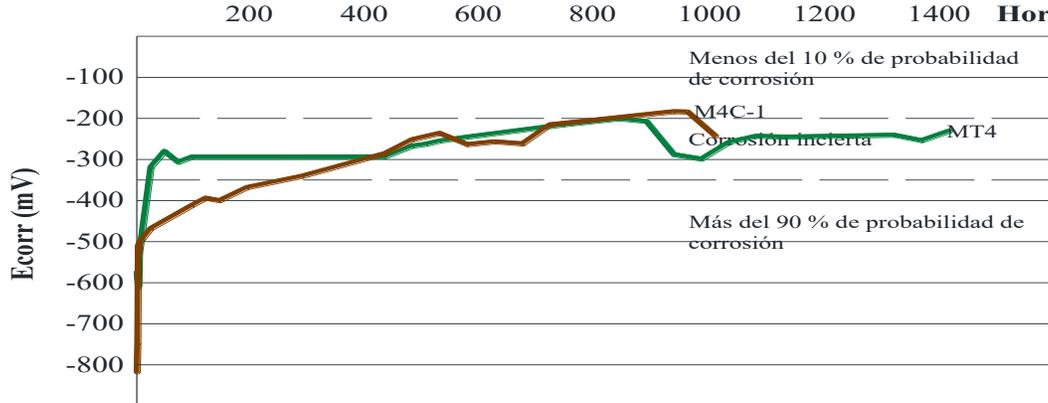


Gráfica 68. Velocidad de corrosión en $\mu\text{m/año}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT4 Y M4C-1.

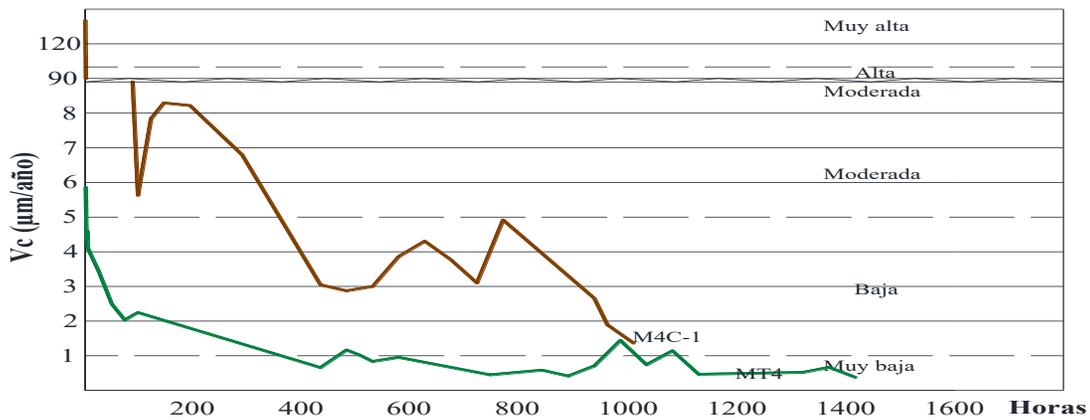


Gráfica 69. Resistividad en $\text{K}\Omega\text{-cm}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 4, 5 y 6, de los concretos MT4 Y M4C-1.

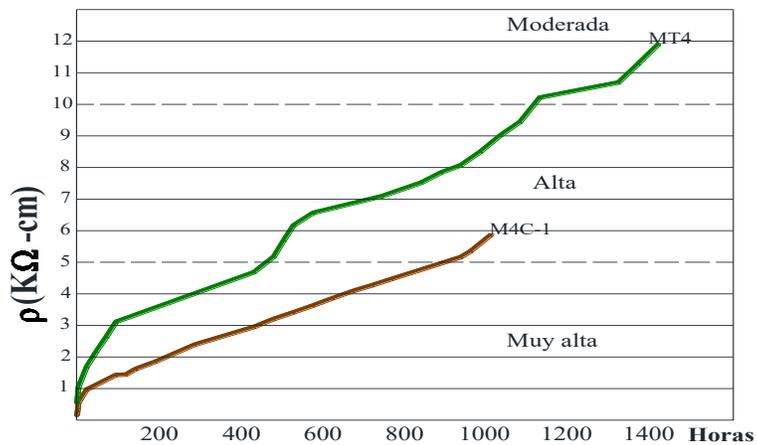
En las gráficas 70, 71 y 72, se presentan las mediciones de los promedios de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT4 Y M4C-1, sumergidos en solución de cloruros de 45000 ppm.



Gráfica 70. Potencial de corrosión en mV contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT4 Y M4C-1.



Gráfica 71. Velocidad de corrosión en $\mu\text{m}/\text{año}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT4 Y M4C-1.



Gráfica 72. Resistividad en $\text{K}\Omega\text{-cm}$ contra el tiempo en horas, de los especímenes 7, 8 y 9, de los concretos MT4 Y M4C-1.

En la comparativa 8 integrada por los concretos MT4 y M4C-1 para determinar la influencia de la presencia de cloruros en las mezclas con relación a/c de 0.6, se observa lo siguiente: Durante las primeras 400 horas después del colado de estos concretos se tienen diferencias notables en su potencial de corrosión; los registros de potencial de corrosión del concreto MT4 tienden a hacerse más positivos dentro de las primeras 24 horas, mientras que el concreto M4C-1 presenta también potenciales cada vez más positivos, pero no con el mismo crecimiento que los alcanzados en el concreto MT4. Los especímenes 1, 2 y 3, de estos concretos después de las primeras 400 horas del colado, siguen la misma tendencia en los registros del potencial de corrosión y hasta 700 horas después del colado, cuando entran en contacto con la solución salina de 5000 ppm de iones Cl^- . A partir de ese tiempo se llega a registros muy similares en los dos concretos, mostrando el mismo comportamiento desde estas 700 horas hasta los últimos registros de este ensaye, con un potencial de corrosión cerca de -200 mV. En los especímenes 4, 5 y 6, el potencial de corrosión registrado en el concreto MT4 presenta mediciones más positivas que el concreto M3C-1 hasta cerca de las primeras 800 horas después del colado, cuando entran en contacto con la solución de 15000 ppm de iones Cl^- . A partir de ese tiempo se presentan registros de potencial de corrosión muy similares con un potencial cerca de los -200 mV. En los especímenes 7, 8 y 9, después de las primeras 400 horas del colado, los registros del potencial de corrosión son muy diferentes; en los dos concretos la tendencia a partir de estas 400 horas es la misma, tienden a llegar a -200 mV cerca de las 800 horas. A partir de ese tiempo, cuando entran en contacto con la solución salina de 45000 ppm de iones Cl^- , tienden a hacerse más negativos entrando a la zona catalogada como corrosión incierta del acero de refuerzo.

En las primeras horas después del colado la velocidad de corrosión de estos concretos, registraron mediciones muy diferentes; en el concreto MT4 se registraron en promedio velocidades de corrosión cercanas a $6.0 \mu\text{m/año}$, catalogando como moderada esta velocidad de corrosión; en el concreto M4C-1, en las primeras horas se registraron velocidades de corrosión cercanas a $135.6 \mu\text{m/año}$ ubicando esta velocidad de corrosión como muy alta; la tendencia de la velocidad de corrosión de estos concretos es a bajar, hasta tener cambios significativos en esta tendencia; en el concreto MT4 la velocidad de corrosión baja significativamente hasta llegar a $2.0 \mu\text{m/año}$ en aproximadamente 100 horas después del colado, para después bajar de manera paulatina hasta $1.0 \mu\text{m/año}$ cerca de las 700 horas de ensayo y a partir de entonces las mediciones se estabilizan por las siguientes horas de ensayo en registros cercanos a $0.8 \mu\text{m/año}$; en el concreto M4C-1 la tendencia dentro de las primeras 100 horas después del colado es bajar significativamente hasta cerca de $5.0 \mu\text{m/año}$ y registrando mediciones por encima de esta velocidad hasta cerca de 300 horas de ensayo, donde la tendencia de velocidad de corrosión tiende a bajar hasta llegar a $2.0 \mu\text{m/año}$ en aproximadamente 900 horas de prueba. En estos concretos se puede observar, que después de que sus respectivos especímenes fueron sumergidos en las soluciones salinas, no presentaron cambios significativos en su velocidad de corrosión.

En esta comparativa, el comportamiento de la resistividad presenta diferencias notables, pues el concreto MT4 tiende a presentar mediciones de la resistividad más altas en menor tiempo que el concreto M4C-1; se puede observar aproximadamente a 900 horas de registros, el concreto MT4 presenta mediciones en promedio de 8.3 K Ω .cm con una velocidad de corrosión alta y el concreto M4C-1 presenta una resistividad de 5.0 K Ω .cm con una velocidad de corrosión muy alta a las mismas 900 horas de registros. Después de sumergir los especímenes de estos concretos en las soluciones salinas no se presentaron cambios sobresalientes en sus registros de resistividad.

4.3.- Resultado de las pruebas complementarias

4.3.1.- Prueba de resistencia a la penetración de fluidos (ión cloruro)

Esta prueba determina la conductancia eléctrica del concreto; proporciona una indicación rápida de su resistencia a la penetración de iones de cloruro. Los especímenes usados para esta prueba como para las pruebas mecánicas no fueron sumergidos en las soluciones con cloruros, tuvieron un curado normal en un cuarto húmedo hasta los días de ensayo.

Los resultados de esta prueba se presentan en la Tabla 9 y 10, clasificando la permeabilidad según la Tabla 4, como se muestra en la gráfica 73.

En teoría la relación a/c es determinante en la permeabilidad del concreto; en estos resultados se observa como el concreto con relación a/c de 0.4 a los 28 días y 90 días registra una permeabilidad moderada, considerando a este concreto con una calidad buena; en el concreto con relación a/c de 0.4 con 5% de humo de sílice del peso del cemento, registro a los 28 días y 90 días una permeabilidad baja y muy baja, respectivamente, lo que indica que el concreto tiene ventaja en comparación con el concreto sin humo de sílice; en los siguientes concretos con relaciones a/c de 0.5 y 0.6, registraron una permeabilidad moderada, sin embargo, las mediciones en promedio son de 3184.8 y 3718.5 Coulombs a los 28 días y a los 90 días registraron 1851.1 y 1927.9 respectivamente, lo que indica que a mayor relación a/c se tiene mayor permeabilidad al ion cloruro.

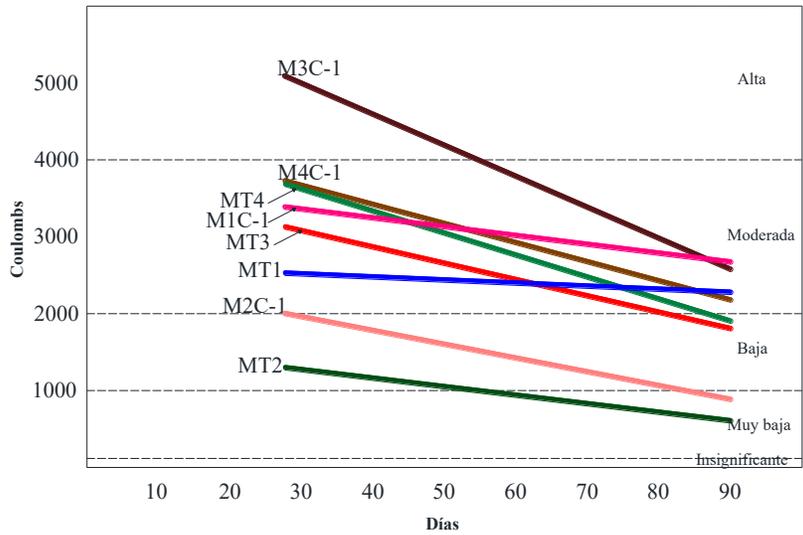
Los concretos con el 1% de cloruros del peso del cemento o cementante, presentan registros de cargas en Coulombs mayores, en promedio 30% más altas a los 28 días, sin embargo, por el rango de la Tabla 4, la mayoría de las mezclas registran la misma permeabilidad que los concretos sin cloruros añadidos a la mezcla, solo el concreto M3C-1 registro una permeabilidad alta a diferencia de la mezcla MT3 que presenta una permeabilidad moderada. Los registros a los 90 días de estos concretos presentaron el mismo incremento de 30% en promedio en las mediciones con respecto a los concretos sin cloruros añadidos a la mezcla. Comparando las mezclas MT3 y MT4 con M3C-1 y M4C-1, respectivamente, se observa que la clasificación de permeabilidad pasa de baja a moderada, propiciada por la presencia de cloruros en la mezcla.

Tabla 9. Resultados de la resistencia a la penetración del ion cloruro a 28 días, clasificando su permeabilidad según la tabla 4.

Mezcla	Pastilla			Promedio	Permeabilidad
	1	2	3		
MT1	1912.4	2752.7	2994.2	2553.1	Moderada
MT2	1233.7	1404.0	1226.2	1288.0	Baja
MT3	3431.7	3394.5	2728.1	3184.8	Moderada
MT4	3705.9	3763.3	3686.2	3718.5	Moderada
M1C-1	3245.3	3587.4	3462.1	3431.6	Moderada
M2C-1	1981.5	2121.0	1855.1	1985.9	Baja
M3C-1	4843.4	5503.7	5015.6	5120.9	Alta
M4C-1	3844.0	3889.3	3591.3	3774.9	Moderada

Tabla 10. Resultados de la resistencia a la penetración del ion cloruro a 90 días, clasificando su permeabilidad según la tabla 4.

Mezcla	Pastilla			Promedio	Permeabilidad
	1	2	3		
MT1	2092.7	2558.4	2263.6	2304.9	Moderada
MT2	545.7	628.3	625.8	599.9	Muy baja
MT3	1852.0	1856.7	1844.7	1851.1	Baja
MT4	1852.1	2010.5	1921.0	1927.9	Baja
M1C-1	2327.0	2849.0	2941.0	2705.7	Moderada
M2C-1	831.5	982.1	861.2	891.6	Muy baja
M3C-1	2109.0	2857.7	2929.1	2631.9	Moderada
M4C-1	2269.8	2125.4	2346.6	2247.3	Moderada

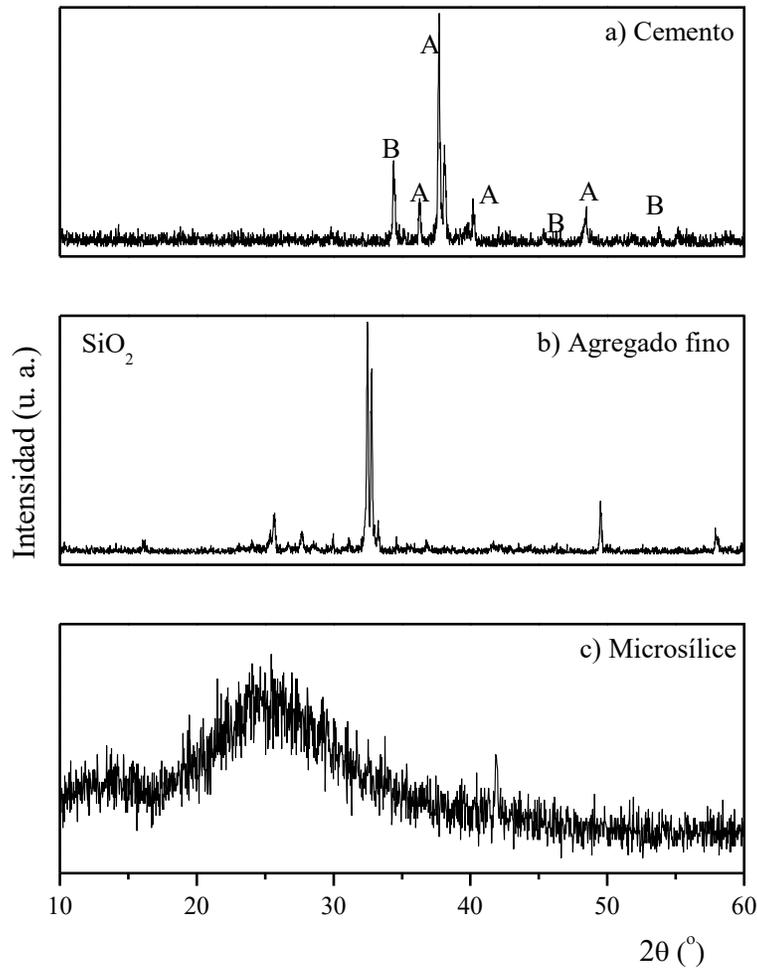


Gráfica 73. Resistencia a la penetración del ion cloruro, determina la conductancia eléctrica del concreto a los 28 y 90 días.

4.3.2.- Prueba de difracción de rayos X

Se realizó la caracterización de las materias primas mediante la técnica de difracción de rayos X, para verificar que no aportaran compuestos clorados al sistema, y que el 1% de Cl en los especímenes de concreto para las pruebas de corrosión sería agregado de manera controlada.

En la gráfica 74, se observan los patrones de difracción de las materias primas. El cemento Portland ordinario (gráfica 74a) presenta mayoritariamente la fase alita (C_3S) y en menor cantidad la fase belita (C_2S), las fases de C_3A y C_4AF son difíciles de identificar por su bajo contenido. En el caso del agregado fino (gráfica 74b), todos los picos corresponden a óxido de silicio (SiO_2). Finalmente, el difractograma de la microsílíce (gráfica 74c) se caracteriza por un hombro ancho, que indica la presencia de una fase no cristalina (amorfa) de sílice (SiO_2), es decir, una fase vítrea. La presencia de esta estructura nos indica una alta reactividad puzolánica. En ninguno de los materiales se observó la presencia de compuestos clorados, por lo que se determina que no aportaran cloruros al sistema.

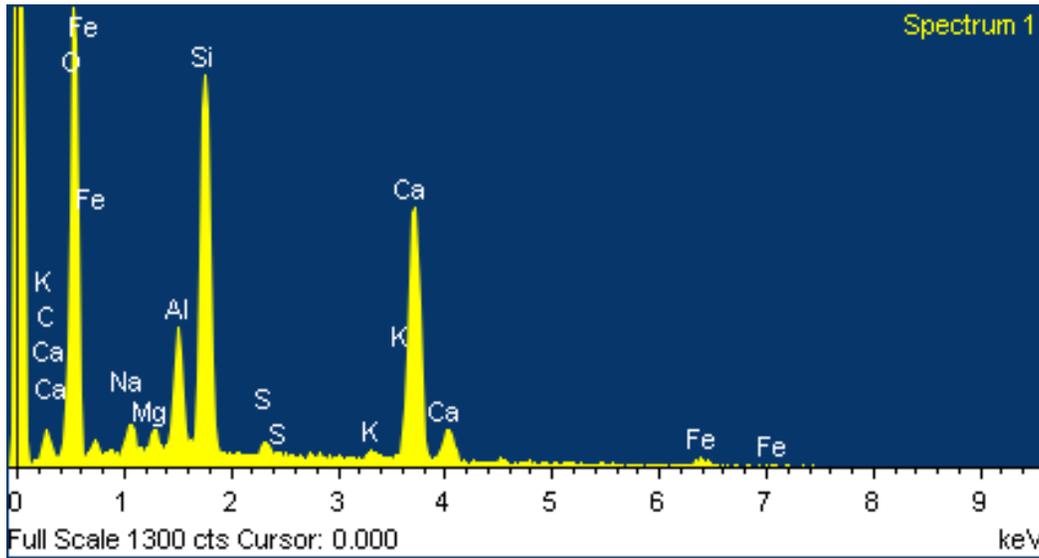


Gráfica 74. Patrones de difracción de rayos X de las materias primas. a) Cemento, b) Agregado fino y c) Microsílice.

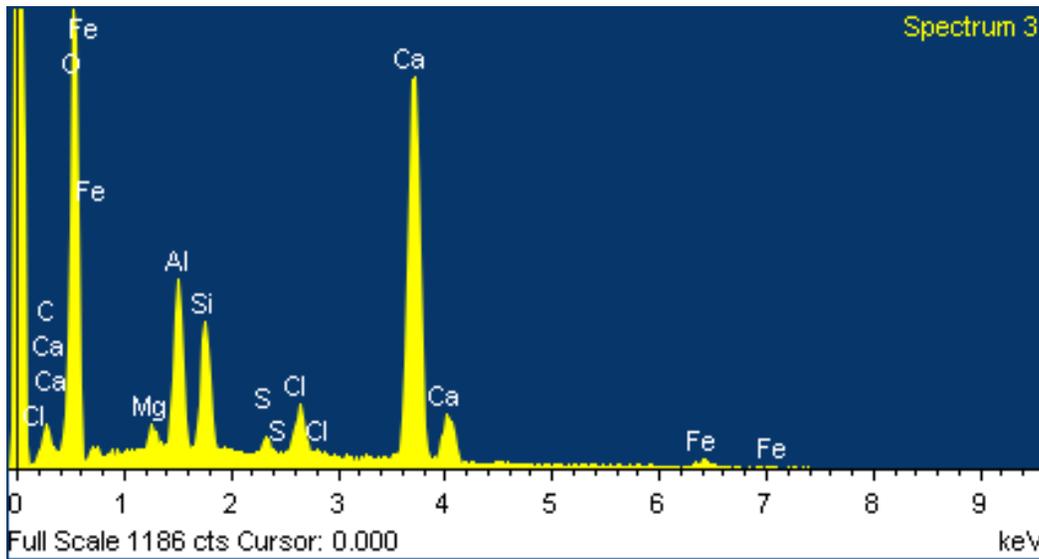
4.3.3.- Espectroscopia de dispersión de energía (EDS)

En la gráfica 75, se presentan los espectros obtenidos por EDS para determinar el contenido de cloruros. En la gráfica 75a, se observa los átomos presentes en el espécimen, como era de esperarse esta muestra está libre de cloro debido a que ninguna de las materias primas iniciales aporta dicho átomo o compuestos clorados. En cambio, en la gráfica 74b el espectro muestra la presencia de cloro o compuestos clorados debido a que se agregó el 1%, al realizar la cuantificación se determina un contenido de 0.9% de cloruros incluido, lo cual concuerda con las cantidades agregadas al sistema.

a)



b)



Gráfica 74. Espectros obtenidos mediante EDS para determinar la presencia de cloro.

a) Espécimen de concreto libre de cloro b) Espécimen de concreto con 1% de Cl.

4.4.-Resultados de las pruebas mecánicas

4.4.1.- Resistencia a compresión

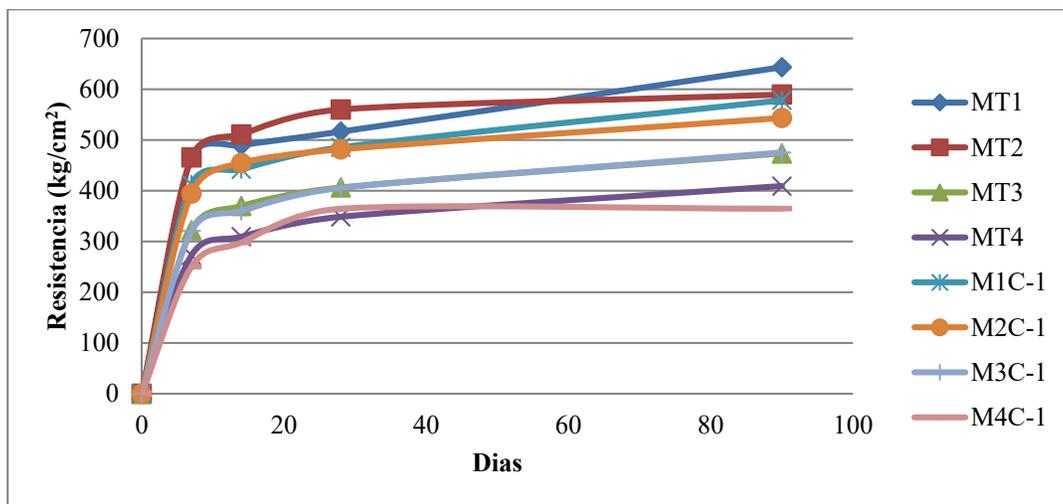
Los resultados de esta prueba se presentan en la Tabla 11, y en la gráfica 75 se muestran el comportamiento de las resistencias al paso del tiempo. En el Anexo 2, se muestran los resultados de todos los especímenes ensayados para esta prueba.

Tabla 11. Resultados de las pruebas de compresión en kg/cm², ensayados a 7, 14, 28 y 90 días.

Mezcla	Días			
	7	14	28	90
MT1	465.6	489.6	516.5	643.4
MT2	465.8	510.9	560.2	589.5
MT3	322.2	369.8	406.4	473.5
MT4	272.7	309.4	348.6	409.2
M1C-1	412.1	442.3	485.7	578.3
M2C-1	394.4	454.9	481.6	543.5
M3C-1	320.9	360.1	405.4	475.4
M4C-1	250.1	297.9	364.7	364.7

La relación a/c es determinante en la resistencia del concreto y los resultados obtenidos corroboran este argumento.

Comparando los concretos sin cloruros contra los que fueron adicionados con 1% de cloruros, se puede observar que estos últimos pierden cerca de 10% de la resistencia en el lapso de pruebas, sin embargo, la presencia de cloruros en las mezclas con relación a/c de 0.5 y 0.6 no afecto la resistencia a compresión en forma significativa. Como se puede observar en la gráfica 75.



Gráfica 75. Resistencia a compresión de todos los concretos ensayados a los 7, 14, 28 y 90 día.

4.4.2.- Módulo de elasticidad y relación de Poisson

Los módulos de elasticidad obtenidos para cada concreto se muestran en la Tabla 12 a la edad de 28 días y a la edad 90 días se presentan en la Tabla 13. Los resultados presentados son el promedio de tres ensayos para cada concreto; todos los resultados de cada uno de los especímenes se muestran en el Anexo 2.

Tabla 12. Resultados de la prueba de módulo de elasticidad y relación de Poisson de los concretos a 28 días.

Mezcla	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad, E _c (kg/cm ²)	$E_c/(F*c)^{1/2}$	Relación de poisson	Deformación unitaria máxima, ϵ_p
MT1	527.95	329441.67	14337.83	0.34	0.0025
MT2	572.93	350077.50	14625.62	0.27	0.0022
MT3	396.81	301535.33	15137.26	0.24	0.0021
MT4	338.26	291695.67	15859.94	0.29	0.0019
M1C-1	487.31	317732.33	14393.24	0.30	0.0024
M2C-1	475.95	292515.33	13408.07	0.31	0.0025
M3C-1	394.33	292624.67	14736.09	0.28	0.0021
M4C-1	334.72	274145.33	14984.35	0.33	0.0022

Tabla 13. Resultados de la prueba de módulo de elasticidad y relación de Poisson de los concretos a 90 días.

Mezcla	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad, E _c (kg/cm ²)	$E_c/(F*c)^{1/2}$	Relación de poisson	Deformación unitaria máxima, ϵ_p
MT1	632.89	333360.33	13251.07	0.28	0.0026
MT2	603.86	362992.00	14771.69	0.29	0.0020
MT3	487.90	314245.00	14226.62	0.30	0.0023
MT4	410.46	305500.50	15079.20	0.28	0.0021
M1C-1	584.78	326191.67	13488.94	0.29	0.0024
M2C-1	527.38	307835.00	13404.64	0.29	0.0026
M3C-1	467.53	301642.00	13950.41	0.29	0.0024
M4C-1	364.08	260518.00	13653.42	0.21	0.0023

El módulo de elasticidad es un parámetro importante en la determinación de la rigidez del concreto; comparando los resultados obtenidos de los concretos sin cloruros añadidos a la mezcla con los que si les fue añadido, se puede observar que los concretos sin cloruros tienen mayor módulo de elasticidad, aproximadamente 10% más alto, tanto a los 28 como a los 90 días. La comparativa entre las mezclas con diferentes relaciones a/c, tienden a demostrar que

a mayor relación a/c la tendencia es que su módulo de elasticidad sea menor, es decir un material más deformable. Los concretos a destacar en esta prueba son los que tienen como adición el humo de sílice, pues la mezcla MT2 que es la mezcla sin cloruros añadidos pero con humo de sílice tiene los valores más altos de módulo de elasticidad, tanto a los 28 como a los 90 días; sin embargo, el módulo de elasticidad en concretos con humo de sílice y cloruros añadidos, concreto M2C-1, no destaca de forma significativa en comparación con el de los otros concretos con cloruros añadidos a la mezcla pero sin humo de sílice.

5.- CONCLUSIONES.

- El uso de humo de sílice como adición para el mejoramiento en la protección del acero de refuerzo contra la corrosión es notable, se puede establecer que la durabilidad de un concreto con esta adición será mucho mayor que aquellos que no la tengan, aun para la misma relación a/c.
- En la actividad electroquímica de los concretos con diferentes relaciones a/c, se puede concluir que un concreto con relación a/c baja tiene un mejor desempeño, retardando la actividad corrosiva a mayor tiempo que los concretos con relaciones a/c más altas que una relación a/c de 0.4.
- Los concretos contaminados con el 1% de cloruros del peso del cemento tienen una actividad corrosiva considerable, en comparación con los concretos no contaminados con cloruros, lo que indica que la corrosión potencial del acero de refuerzo está presente en estos concretos, corroborando lo que indica la norma ACI 318 que señala que el umbral del contenido de cloruros para que la corrosión empiece es del 1% de cloruros respecto al peso del cemento; sin embargo, esta actividad aun es pequeña para el tiempo de estudio, pues la migración de los cloruros externos no llegaron al acero de refuerzo. Lo anterior hace necesario seguir analizando estos concretos contaminados, interna y externamente para conocer cuando la actividad corrosiva

crece afectada por los cloruros de las soluciones salinas en las que se encuentran inmersos.

- La actividad corrosiva en todas las mezclas apenas empieza, pues los primeros indicios se presentan en el potencial de corrosión (E_{corr}) en los especímenes sumergidos en la solución con 45000 ppm de cloruros. La resistividad eléctrica y la velocidad de corrosión se incrementarán con el tiempo, en cuanto la capa pasiva se rompa por la presencia o la penetración e incremento de los iones cloruro en los concretos.
- Las pruebas mecánicas indican que los concretos contaminados o no con cloruros tienen en apariencia el mismo comportamiento, lo que puede arrojar un diagnóstico equivocado, si se evaluara un concreto posiblemente contaminado con cloruros analizando, solo sus propiedades mecánicas.
- De los ensayos realizados para determinar el potencial de la actividad corrosiva en el concreto el que mejor detecta esta actividad es la resistividad, la cual permite determinar no solo el potencial corrosivo del material, sino también la velocidad de corrosión.

6.- Referencias

1. T.P. Hoar, Report of the Committee on Corrosion and Protection, "London HMSO", 1971.
2. Tremper, B.; Beaton, J. L.; and Stratfull, R. F., "Causes and Repair of Deterioration to a California Bridge due to Corrosion of Reinforcing Steel in a Marine Environment. II: Fundamental Factors Causing Corrosion," Bulletin No. 182, Highway Research Board, Washington, D.C., 1958, pp. 18-41.
3. Evans, U. R., The Corrosion and Oxidation of Metals: Scientific Principles and Practical Applications, Edward Arnold, London, 1960, 303 pp.
4. Biczók, I., Concrete Corrosion and Concrete Protection, 3rd Edition, Acadèmiai Kiadó, Budapest, 1964.
5. ACI Committee 222R-01. (2001) Protection of Metals in Concrete Against Corrosion. American Society Institute.- EUA.- 2001.
6. ACI Committee 318-11. Building code requirements for structural concrete. American Society Institute.- EUA.
7. ASTM G 193-12 "Standard Terminology and Acronyms Relating to Corrosion".
8. Townsend, H. E., "Potential—pH Diagrams at Elevated Temperature for the System Fe-H₂O," Proceedings of the Fourth International Congress on Metallic Corrosion, Sept. 1969, pp. 477-487.
9. S. T. Amaral and I.L. Muller, Electrochemical behavior of iron in NaOH 0.01 mol/L solution containing variable amounts of silicate, *Journal Brazilian Chem. Soc.*, Vol. 10, No. 3, pp 214-221, 1999.
10. C. Alonso, M. Castellote and C. Andrade, chloride threshold dependence of pitting of reinforcements, *Electrochimica Acta*, Vol. 47, pp 3469-3481, 2002.
11. Foley, R. T., "Complex Ions and Corrosion," *Journal of the Electrochemical Society*, V. 122, No. 11, 1975, pp. 1493-1549.
12. Mansfeld, F., "Recording and Analysis of AC Impedance Data for Corrosion Studies," *Corrosion*, V. 37, No. 5, 1981, pp. 301-307.
13. Taylor, H. F. W., 1967, "La química de los cementos", Urmo, S.A. de Ediciones Bilbao.
14. González Fernández, Miranda Vidales. Corrosión en las estructuras de hormigón armado fundamentos, medida, diagnosis y prevención. CSIC, 2007
15. Fernandez canovas, M., 1994, "Patología y terapéutica del hormigón armado", 3ª edición cap. IV, pp69-90. Madrid.
16. ASTM C876 – 09 "Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete".
17. ASTM G 59-91, "Standard Practique for conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements".
18. Dhir, R. K., Jones, M. R. and McCarthy, M. J. "Quatifying chlorideinduced corrosion from half-cell potential". *Cement and Concrete Research*. Vol. 23, pp. 1443-1454, 1993.
19. González, J. A., Ramírez, E., Bautista, A and Feliú, S. "The behavior of pre-rusted steel in concrete". *Cement and Concrete Research*, Vol 26, No. 3, pp. 501-511, 1996.

- 20.66 Gowers, K. R. and Millard, S. G. "On-site linear polarization resistance mapping of reinforced concrete structures". Corrosion Science, Vol. 35, Nos. 5-8, pp. 1593-1600, 1993.
21. Mangat, P. S. and Molloy, B. T. "Factors influencing chloride corrosion of reinforcement in concrete". Materials and Structures, Vol 25, pp. 404- 411, 1992.
22. ASTM WK 37880. "New Test Method for Measuring the Surface Resistivity of Hardened Concrete Using the Wenner Four-Electrode Method".
23. ASTM-C-1202." ASTM-C-1202. "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration"
24. Carlos F. Duarte G., Uwe Preckwinkel. "Difracción de Rayos X por Polvos". Editores: José Luis Boldú Olaizola (IFUNAM), J. Gerardo Cabañas Moreno (ESFM-IPN). Sociedad Mexicana de Cristalografía. 2001.
25. Askeland, Donald R. "Ciencia e ingeniería de los materiales", International Thomson Editores, tercera edición, universidad de missouri-Rolla. ISBN 968-7529-36-9.
26. NMX C 156, INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-CONCRETO HIDRAULICO-DETERMINACION DEL REVENIMIENTO EN EL CONCRETO FRESCO
27. ASTM C 143, Método de ensaye estándar para la determinación del revenimiento en el concreto a base de cemento hidráulico
28. ASTM C 1362, Standard Test Method for Flow of Freshly Mixed Hydraulic Cement Concrete
29. NMX C 157, INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-CONCRETO-DETERMINACION DEL CONTENIDO DE AIRE DEL CONCRETO FRESCO POR EL METODO DE PRESION
30. ASTM C 231, Método de Ensayo Normalizado de Contenido de Aire del Concreto Recién Mezclado Mediante el Método por Presión
31. NMX C-162, INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-CONCRETO HIDRAULICO-DETERMINACION DE LA MASA UNITARIA, CALCULO DEL RENDIMIENTO Y CONTENIDO DE AIRE DEL CONCRETO FRESCO POR EL METODO GRAVIMETRICO
32. ASTM C-29, Método de ensaye estándar para determinar la densidad en masa (peso unitario) e índice de huecos en los agregados.
33. ASTM C 138, Método de Ensayo Normalizado de Densidad (Peso Unitario), Rendimiento, y Contenido de Aire (Gravimétrico) del Concreto
34. NMXC 83, INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO-DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES-MÉTODO DE ENSAYO.
35. ASTM C 39, Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto
36. NMXC 128, INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO SOMETIDO A COMPRESIÓN-DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDADESTÁTICO Y RELACIÓN DE POISSON
37. ASTM C 469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression
38. NMX C-122, INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-AGUA PARA CONCRETO-ESPECIFICACIONES.

39. NMX C-252, INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN TUBOS DE CONCRETO PREENFORZADO, SIN CILINDRO DE ACERO, PARA CONDUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA A PRESIÓN-ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO.
40. NMX C-253, INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-TUBOS DE CONCRETOPREENFORZADO CON CILINDRO DE ACERO PARA CONDUCCION Y DISTRIBUCION DE AGUA A PRESION-ESPECIFICACIONES Y METODOS DE ENSAYO.
41. NMX C-111, INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN - AGREGADOS PARA CONCRETO HIDRÁULICO-ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA.
42. ASTM C 127, Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Gruesos.
43. ASTM C 128, Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Finos.
44. ASTM C 70 Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate
45. ASTM C 1240 – 15, Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures.
46. Andrade, M.C. and Macias, A. (1988), “Galvanized reinforcements in concrete”, Wilson, A., Nicholson, J. and Prosser, H. (Eds.), Surface Coatings 2, Elsevier, London, pp. 137-182.

ANEXO 1

LECTURAS PROMEDIO DE LOS ESPECÍMENES DE LOS CONCRETOS MT1, MT2, MT3, MT4, M1C-1, M2C-1, M3C-1 Y M4C-1 INMERSOS EN SOLUCIONES SALINAS DE 5000 PPM, 15000 PPM Y 45000 PPM.

Tabla A.1.1.- Concreto MT1 en solución salina de 5000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO MT1			
ESPECÍMENES 1, 2 Y 3			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
2	-658.1	5.437	0.53
3	-646.3	4.901	0.71
4	-620.1	5.033	0.80
5	-516.0	3.690	0.93
19	-317.6	2.196	1.23
24	-315.7	2.349	1.32
29	-331.5	2.275	1.43
53	-304.9	2.145	2.16
77	-336.4	1.586	2.94
101	-301.1	1.565	3.73
197	-316.0	1.646	4.31
221	-346.4	1.795	5.14
245	-319.1	1.381	5.62
293	-307.5	1.781	6.06
317	-321.6	1.766	6.53
341	-289.0	2.241	7.01
365	-289.0	2.070	7.50
389	-278.4	1.927	7.89
413	-255.3	1.447	8.50
749	-230.3	1.794	9.09
797	-201.6	1.385	9.55
845	-190.7	0.437	10.15
869	-205.6	0.511	10.52
1013	-174.8	0.441	10.90
1085	-186.1	0.618	11.23
1181	-164.7	0.370	11.69
1229	-167.7	0.503	12.23
1277	-166.1	0.382	12.64
1325	-170.4	0.417	13.00
1373	-152.9	0.307	13.31
1421	-138.9	0.307	13.66
1469	-120.7	0.472	13.93
1613	-119.2	0.338	14.22
1661	-110.6	0.346	14.52

Tabla A.1.2.- Concreto MT1 en solución salina de 15000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO MT1			
ESPECÍMENES 4, 5 Y 6			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
2	-635.7	4.004	0.53
3	-618.2	3.759	0.66
4	-581.6	2.998	0.76
5	-509.1	3.250	0.88
19	-324.3	1.780	1.20
24	-307.6	1.502	1.35
29	-337.6	2.187	1.45
53	-318.5	1.742	1.81
77	-310.1	1.146	2.20
101	-283.8	1.303	2.55
197	-305.7	0.841	2.78
221	-334.7	1.040	3.13
245	-331.7	0.887	3.58
293	-339.7	1.163	4.45
317	-338.4	1.031	4.81
341	-295.5	1.212	5.70
365	-297.5	1.258	6.15
389	-271.5	1.285	6.47
413	-265.3	0.821	6.72
749	-244.0	0.409	7.21
797	-215.7	0.303	7.60
845	-208.8	0.602	8.16
869	-188.4	0.806	8.52
1013	-181.6	0.586	9.41
1085	-194.3	0.448	10.28
1181	-188.7	0.283	11.15
1229	-198.9	0.350	11.71
1277	-185.2	0.472	12.49
1325	-187.9	0.472	13.14
1373	-175.1	0.291	13.48
1421	-211.1	0.232	13.73
1469	-186.1	0.275	14.15
1613	-143.2	0.500	14.31
1661	-197.5	0.496	14.43

Tabla A.1.3.- Concreto MT1 en solución salina de 45000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO MT1			
ESPECÍMENES 7, 8 Y 9			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
2	-648.4	3.961	0.45
3	-642.1	3.724	0.56
4	-565.1	3.647	0.66
5	-531.1	3.290	0.78
19	-311.2	1.678	0.97
24	-274.4	1.535	1.12
29	-321.2	1.962	1.22
53	-312.0	1.779	1.58
77	-311.7	1.194	1.97
101	-285.6	1.187	2.32
197	-263.1	0.895	2.55
221	-282.1	0.975	2.90
245	-270.3	0.861	3.35
293	-264.8	1.007	4.22
317	-271.5	1.174	4.58
341	-251.3	1.244	5.47
365	-247.9	1.178	5.92
389	-242.2	1.194	6.24
413	-235.0	0.680	6.49
749	-212.8	0.913	6.98
797	-203.3	0.362	7.37
845	-201.3	0.728	7.93
869	-187.8	0.374	8.29
1013	-177.1	0.618	9.18
1085	-181.7	0.500	10.05
1181	-235.2	0.472	10.92
1229	-215.1	0.704	11.48
1277	-213.0	0.441	12.26
1325	-221.6	0.559	12.91
1373	-213.5	0.393	13.25
1421	-229.5	0.795	13.50
1469	-227.0	0.798	13.92
1613	-191.3	0.444	14.05
1661	-223.4	0.618	14.17

Tabla A.1.4.- Concreto MT2 en solución salina de 5000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO MT2			
ESPECÍMENES 1, 2 Y 3			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
2	-618.5	6.393	0.58
3	-619.5	7.886	0.63
4	-621.9	7.181	0.68
5	-580.6	5.408	0.75
7	-447.0	3.640	0.80
8	-398.6	2.311	0.91
24	-288.3	2.277	1.41
48	-316.8	1.794	1.64
72	-318.1	1.345	1.95
96	-321.4	2.026	2.21
144	-302.2	1.378	2.65
168	-317.2	1.541	3.20
192	-313.1	1.317	3.65
216	-309.5	2.347	4.04
240	-274.4	2.402	4.83
264	-275.0	1.381	5.44
576	-274.5	0.842	6.74
624	-266.9	1.455	7.09
648	-233.3	0.975	7.65
672	-226.4	0.975	8.21
816	-184.3	0.610	8.57
888	-178.7	0.732	9.10
984	-205.5	0.405	9.55
1032	-187.9	0.153	10.01
1080	-207.3	0.244	10.36
1128	-170.2	0.326	10.81
1176	-197.1	0.551	11.44
1224	-172.5	0.295	11.89
1272	-163.3	0.456	12.32
1464	-136.2	0.252	12.71
1512	-133.8	0.346	13.16
1560	-139.4	0.311	13.55

Tabla A.1.5.- Concreto MT2 en solución salina de 15000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO MT2			
ESPECÍMENES 4, 5 Y 6			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
2	-611.2	5.122	0.64
3	-617.7	5.985	0.56
4	-628.5	5.497	0.62
5	-588.2	2.369	0.78
7	-541.1	3.517	0.93
8	-316.9	2.003	1.04
24	-297.7	1.761	1.47
48	-305.6	1.600	1.72
72	-311.0	1.373	2.03
96	-335.7	1.412	2.28
144	-303.3	1.292	2.70
168	-320.9	1.581	3.22
192	-306.3	1.173	3.65
216	-290.6	2.204	4.01
240	-263.9	2.269	4.77
264	-278.3	1.079	5.38
576	-300.3	0.798	6.68
624	-245.4	0.728	7.03
648	-219.1	1.204	7.59
672	-205.7	0.594	8.15
816	-174.0	0.409	8.51
888	-160.3	0.378	9.04
984	-218.5	0.275	9.49
1032	-195.4	0.637	9.95
1080	-222.2	0.287	10.30
1128	-188.5	0.893	10.75
1176	-226.5	0.189	11.38
1224	-197.7	0.256	11.83
1272	-185.2	0.283	12.26
1464	-176.3	0.342	12.65
1512	-160.8	0.303	13.10
1560	-170.8	0.480	13.49

Tabla A.1.6.- Concreto MT2 en solución salina de 45000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO MT2			
ESPECÍMENES 7, 8 Y 9			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
2	-607.4	5.558	0.54
3	-611.4	6.905	0.60
4	-628.7	6.665	0.73
5	-607.2	4.990	0.86
7	-546.4	4.789	0.91
8	-323.0	2.286	0.96
24	-319.3	1.959	1.50
48	-309.0	1.420	1.75
72	-299.5	1.317	2.05
96	-311.4	1.192	2.29
144	-291.0	1.388	2.70
168	-305.0	1.284	3.20
192	-319.7	1.696	3.60
216	-297.9	1.998	3.90
240	-261.4	2.162	4.60
264	-267.7	1.079	5.21
576	-274.0	0.952	6.51
624	-276.7	0.248	6.86
648	-218.8	0.507	7.42
672	-198.4	0.637	7.98
816	-178.9	0.409	8.34
888	-163.5	0.287	8.87
984	-223.2	0.429	9.32
1032	-210.1	0.873	9.78
1080	-228.4	0.393	10.13
1128	-246.1	0.488	10.58
1176	-242.5	0.267	11.21
1224	-193.0	0.433	11.66
1272	-202.8	0.275	12.09
1464	-188.3	0.338	12.48
1512	-190.3	0.330	12.93
1560	-202.6	0.354	13.32

Tabla A.1.7.- Concreto MT3 en solución salina de 5000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO MT3			
ESPECÍMENES 1, 2 Y 3			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-564.7	4.761	0.53
2	-629.4	4.488	0.58
4	-645.5	3.866	0.64
5	-301.2	1.869	0.71
26	-294.5	1.772	1.20
50	-263.7	1.080	1.19
74	-353.7	1.606	1.46
98	-296.7	1.706	1.65
122	-273.8	1.634	1.92
146	-292.9	1.382	2.08
170	-272.2	1.607	2.48
194	-282.1	1.603	2.98
218	-256.4	1.755	3.38
554	-255.7	0.629	6.38
602	-254.6	0.425	6.58
626	-230.7	0.452	6.88
626	-236.5	0.507	7.08
674	-225.5	0.869	7.38
770	-193.7	0.673	7.88
842	-204.8	0.437	8.38
938	-176.4	0.342	8.68
986	-176.6	0.362	9.18
1034	-184.3	0.657	9.58
1082	-176.7	0.594	9.98
1130	-172	1.050	10.28
1178	-183.2	0.409	10.68
1226	-170.0	0.334	11.08
1418	-162.7	0.291	11.55
1466	-155.1	0.559	11.75
1514	-163.9	0.303	11.92

Tabla A.1.8.- Concreto MT3 en solución salina de 15000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO MT3			
ESPECÍMENES 4, 5 Y 6			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-583.9	7.706	0.51
2	-629.7	5.582	0.55
4	-632.1	7.507	0.60
5	-327.7	2.906	0.65
26	-312.4	2.275	1.14
50	-296.7	2.174	0.98
74	-330.9	1.803	1.18
98	-326.5	2.120	1.37
122	-306.6	1.546	1.62
146	-324.5	1.870	1.77
170	-296.9	1.975	2.17
194	-298.0	2.331	2.67
218	-272.6	1.973	3.07
554	-268.1	0.680	6.07
602	-257.7	0.787	6.27
626	-246.6	0.551	6.57
626	-251.8	0.680	6.77
674	-221.0	0.527	7.07
770	-208.8	1.164	7.57
842	-190.7	0.511	8.07
938	-191.1	0.382	8.37
986	-208.2	0.338	8.87
1034	-212.9	0.456	9.27
1082	-224.8	1.027	9.63
1130	-212.0	0.425	9.97
1178	-203.1	0.393	10.32
1226	-183.7	0.500	10.62
1418	-183.9	0.673	11.02
1466	-203.2	0.578	11.36
1514	-185.7	0.358	11.62

Tabla A.1.9.- Concreto MT3 en solución salina de 45000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO MT3			
ESPECÍMENES 7, 8 Y 9			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-545.5	4.597	0.56
2	-611.7	4.042	0.61
4	-623.1	3.289	0.64
5	-351.9	1.953	0.70
26	-330.9	1.445	1.25
50	-302.5	1.064	1.08
74	-322.1	1.154	1.28
98	-372.4	1.554	1.47
122	-307.3	0.975	1.72
146	-318.0	1.601	1.87
170	-301.4	1.528	2.20
194	-304.8	1.505	2.70
218	-272.3	1.611	3.10
554	-278.1	0.663	6.10
602	-267.1	0.456	6.30
626	-259.3	0.830	6.60
626	-272.1	0.881	6.80
674	-246.4	0.496	7.10
770	-239.0	0.739	7.60
842	-181.0	0.555	8.10
938	-202.7	0.299	8.40
986	-215.2	0.370	8.56
1034	-248.4	0.236	8.89
1082	-305.8	0.464	9.24
1130	-274.9	1.011	9.41
1178	-258.7	0.334	9.60
1226	-271.3	0.319	9.75
1418	-238.2	0.315	9.96
1466	-222.1	0.594	10.06
1514	-217.7	0.397	10.17

Tabla A.1.10.- Concreto MT4 en solución salina de 5000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO MT4			
ESPECÍMENES 1, 2 Y 3			
Horas	Ecorr(mV)	Icorr (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-551.8	5.302	0.48
2	-581.3	4.765	0.54
3	-604.0	4.815	0.66
4	-545.5	2.961	0.79
5	-493.0	3.006	0.98
25	-308.2	3.135	1.57
49	-279.0	2.112	2.00
73	-303.0	1.915	2.46
97	-301.8	1.861	2.96
433	-293.5	0.688	4.66
481	-272.5	1.086	5.26
505	-258.7	0.641	5.73
529	-254.4	0.983	6.23
577	-224.8	0.539	7.26
745	-227.4	0.374	7.65
841	-200.2	0.342	8.14
889	-212.3	0.413	8.50
937	-204.6	0.511	8.79
985	-205.7	0.720	9.25
1033	-219.4	0.503	9.74
1081	-216.2	0.783	10.13
1129	-210.3	0.468	10.56
1321	-203.5	0.433	10.94
1369	-191.9	0.574	11.35
1417	-186.3	0.338	11.72

Tabla A.1.11.- Concreto MT4 en solución salina de 15000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO MT4			
ESPECÍMENES 4, 5 Y 6			
Horas	Ecorr(mV)	Icorr (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-582.0	6.180	0.52
2	-607.2	5.729	0.57
3	-622.2	5.808	0.68
4	-615.4	4.717	0.81
5	-590.3	4.064	1.00
25	-307.6	3.516	1.62
49	-252.8	2.044	1.99
73	-285.7	1.672	2.51
97	-275.2	2.110	3.01
433	-295.0	0.724	4.72
481	-251.5	0.787	5.32
505	-250.9	1.113	5.75
529	-229.4	0.594	6.53
577	-240.8	0.728	7.03
745	-199.2	0.476	7.63
841	-190.9	0.559	8.29
889	-220.9	0.448	8.65
937	-210.0	0.378	8.94
985	-203.5	0.724	9.38
1033	-186.1	0.665	9.92
1081	-209.6	0.330	10.31
1129	-224.8	0.677	10.94
1321	-193.7	0.618	11.32
1369	-184.8	0.806	11.73
1417	-171.5	0.889	12.1

Tabla A.1.12.- Concreto MT4 en solución salina de 45000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO MT4			
ESPECÍMENES 7, 8 Y 9			
Horas	Ecorr(mV)	Icorr (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-576.2	5.855	0.56
2	-594.7	4.755	0.62
3	-611.3	4.349	0.73
4	-606.4	4.593	0.86
5	-529.1	4.096	1.03
25	-319.4	3.432	1.68
49	-280.7	2.489	2.17
73	-307.2	2.028	2.63
97	-294.4	2.245	3.11
433	-294.0	0.657	4.68
481	-267.7	1.164	5.17
505	-263.0	1.019	5.68
529	-255.3	0.834	6.16
577	-245.8	0.952	6.56
745	-215.7	0.448	7.09
841	-201.1	0.582	7.52
889	-207.6	0.413	7.84
937	-288.5	0.704	8.07
985	-299.4	1.440	8.50
1033	-258.7	0.739	9.01
1081	-243.5	1.141	9.44
1129	-245.8	0.464	10.21
1321	-241.2	0.519	10.69
1369	-254.4	0.665	11.28
1417	-231.2	0.378	11.89

Tabla A.1.13.- Concreto MIC-1 en solución salina de 5000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO MIC-1			
ESPECÍMENES 1, 2 Y 3			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-529.7	70.936	0.27
2	-552.5	86.850	0.31
3	-547.0	58.815	0.41
4	-526.3	40.666	0.47
5	-516.1	41.893	0.65
25	-465.4	18.865	1.20
49	-431.0	14.311	1.65
385	-263.3	2.120	3.23
433	-264.6	1.546	3.72
457	-235.1	2.045	4.02
505	-246.4	2.450	4.30
553	-228.0	3.068	4.69
649	-232.9	1.723	5.18
697	-224.4	4.130	5.46
793	-202.6	2.820	6.13
841	-204.5	1.967	6.81
889	-195.1	2.391	7.31
937	-187.8	1.585	7.62
985	-162.3	1.298	8.08
1033	-157.3	1.329	8.77
1081	-159.6	2.171	9.33
1129	-155.1	2.820	9.68
1297	-137.6	2.765	10.48
1321	-143.5	4.051	10.88
1369	-164.2	2.431	11.12

Tabla A.1.14.- Concreto M1C-1 en solución salina de 15000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO M1C-1			
ESPECÍMENES 4, 5 Y 6			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-527.7	90.918	0.55
2	-555.1	92.860	0.18
3	-563.2	80.994	0.22
4	-532.5	46.440	0.50
5	-500.3	56.098	0.69
25	-459.0	39.404	0.80
49	-408.8	19.912	1.14
385	-299.7	2.572	2.44
433	-300.2	2.431	2.91
457	-276.3	2.037	3.26
505	-272.4	2.450	3.43
553	-267.2	2.757	3.96
649	-274.0	2.376	4.55
697	-279.6	2.010	4.90
793	-240.6	1.766	5.45
841	-236.8	3.540	5.75
889	-248.7	1.479	6.33
937	-256.8	2.384	6.93
985	-239.0	0.736	7.46
1033	-250.7	1.624	8.12
1081	-244.9	1.731	8.57
1129	-243.7	1.790	9.00
1297	-229.9	1.404	9.26
1321	-219.9	1.798	9.71
1369	-233.1	1.440	9.98

Tabla A.1.15.- Concreto M1C-1 en solución salina de 45000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO M1C-1			
ESPECÍMENES 7, 8 Y 9			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-524.1	104.585	0.15
2	-551.3	90.978	0.17
3	-570.1	74.747	0.19
4	-539.6	79.899	0.28
5	-515.6	47.860	0.49
25	-457.7	21.277	0.71
49	-418.1	11.421	1.08
385	-299.6	1.774	2.86
433	-295.3	2.372	3.32
457	-276.8	2.592	3.73
505	-266.1	2.450	4.07
553	-257.7	2.010	4.82
649	-260.6	2.698	5.14
697	-277.2	2.120	5.18
793	-216.0	1.400	5.58
841	-225.9	2.553	6.00
889	-229.6	1.204	6.15
937	-248.1	1.798	6.42
985	-240.7	1.188	6.98
1033	-245.6	1.392	7.37
1081	-236.1	1.322	7.64
1129	-228.7	1.440	8.10
1297	-195.1	2.557	8.30
1321	-226.2	1.267	8.40
1369	-199.5	1.565	8.63

Tabla A.1.16.- Concreto M2C-1 en solución salina de 5000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO M2C-1			
ESPECÍMENES 1, 2 Y 3			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-593.3	116.977	0.20
2	-618.8	94.203	0.24
3	-612.6	79.689	0.34
4	-589.4	54.319	0.41
5	-578.0	38.389	0.56
25	-521.3	9.161	1.12
49	-482.7	5.872	1.43
73	-420.5	2.120	1.64
241	-347.3	2.600	2.32
289	-339.3	2.234	2.56
313	-314.3	1.259	2.81
337	-327.1	3.037	3.03
385	-308.2	2.273	3.31
481	-301.2	1.817	4.02
529	-286.3	3.304	4.31
625	-295.6	0.975	4.95
673	-268.6	1.479	5.23
721	-264.8	0.948	5.52
769	-240.8	1.412	5.75
817	-233.7	1.097	6.01
865	-213.8	1.762	6.26
913	-198.2	1.093	6.47
961	-183.4	1.129	6.74
1129	-194.0	1.589	7.44
1153	-205.0	1.365	7.71
1201	-187.9	1.381	8.03

Tabla A.1.17.- Concreto M2C-1 en solución salina de 15000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO M2C-1			
ESPECÍMENES 4, 5 Y 6			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-591.0	109.457	0.18
2	-621.7	105.335	0.19
3	-630.8	81.892	0.23
4	-596.4	52.903	0.29
5	-560.3	40.592	0.52
25	-514.1	9.625	1.04
49	-457.9	6.455	1.33
73	-412.2	2.572	1.71
241	-328.4	2.348	2.25
289	-319.7	3.473	2.46
313	-320.5	2.218	2.76
337	-314.5	4.020	3.09
385	-268.7	5.015	3.19
481	-300.6	4.700	3.76
529	-280.9	1.703	4.18
625	-264.6	1.019	4.77
673	-250.2	1.719	4.91
721	-267.5	1.278	5.46
769	-253.6	1.872	5.68
817	-257.4	1.475	5.72
865	-235.0	1.495	5.91
913	-225.1	1.518	6.46
961	-226.0	1.239	6.62
1129	-218.7	1.467	7.13
1153	-213.7	1.798	7.34
1201	-207.1	1.286	7.54

Tabla A.1.18.- Concreto M2C-1 en solución salina de 45000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO M2C-1			
ESPECÍMENES 7, 8 Y 9			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-587.0	124.773	0.16
2	-617.4	107.046	0.19
3	-638.5	89.68	0.26
4	-604.3	55.145	0.35
5	-577.4	34.141	0.50
25	-512.6	8.807	1.02
49	-468.3	6.462	1.27
73	-430.5	1.774	1.48
241	-308.6	3.402	2.23
289	-316.2	3.276	2.47
313	-308.3	2.521	2.68
337	-295.0	4.283	2.94
385	-289.4	4.944	3.16
481	-254.3	4.126	3.72
529	-269.3	1.463	4.05
625	-243.6	2.804	4.62
673	-226.8	0.932	4.88
721	-255.7	1.762	5.17
769	-257.9	2.376	5.39
817	-253.5	1.597	5.63
865	-227.1	1.436	5.89
913	-237.7	4.043	6.08
961	-232.1	1.967	6.31
1129	-242.5	1.621	7.09
1153	-236.6	0.960	7.33
1201	-227.4	1.526	7.67

Tabla A.1.19.- Concreto M3C-1 en solución salina de 5000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO M3C-1			
ESPECÍMENES 1, 2 Y 3			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-709.8	169.106	0.17
2	-736.7	166.109	0.21
3	-695.7	143.610	0.35
4	-666.3	124.191	0.51
5	-658.2	108.851	0.64
25	-623.7	55.480	1.01
49	-536.8	43.227	1.17
145	-406.3	7.945	1.52
193	-397.4	4.508	1.81
265	-396.2	3.182	2.17
289	-394.7	4.067	2.25
457	-375.9	3.918	3.10
601	-341.3	1.322	3.78
649	-383.9	1.837	4.20
697	-294.4	2.502	4.45
745	-296.4	4.559	4.74
793	-276.1	1.837	4.87
841	-266.6	1.113	5.04
889	-253.4	2.450	5.28
937	-252.4	1.805	5.50
1105	-215.9	0.901	6.18
1129	-204.8	1.746	6.32
1177	-208.0	1.471	6.56

Tabla A.1.20.- Concreto M3C-1 en solución salina de 15000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO M3C-1			
ESPECÍMENES 4, 5 Y 6			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-707.1	166.030	0.16
2	-743.8	164.421	0.17
3	-754.7	154.486	0.21
4	-713.6	135.350	0.30
5	-670.4	122.571	0.46
25	-615.1	57.458	0.80
49	-547.8	36.950	0.86
145	-414.5	2.553	1.26
193	-380.1	2.643	1.50
265	-399.5	3.233	1.84
289	-407.1	3.127	2.00
457	-390.1	5.452	2.78
601	-356.2	3.044	3.35
649	-325.1	1.971	3.57
697	-310.1	2.034	3.79
745	-310.9	3.198	4.01
793	-281.8	0.991	4.23
841	-274.5	1.412	4.45
889	-271.3	1.314	4.69
937	-267.8	1.436	4.93
1105	-246.1	1.569	5.78
1129	-240.8	1.137	5.96
1177	-228.2	1.872	6.27

Tabla A.1.21.- Concreto M3C-1 en solución salina de 45000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO M3C-1			
ESPECÍMENES 7, 8 Y 9			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-702.3	164.130	0.18
2	-738.7	155.670	0.16
3	-763.9	143.771	0.21
4	-723.0	123.648	0.30
5	-690.9	114.790	0.37
25	-608.7	41.508	0.66
49	-532.0	30.613	0.86
145	-412.5	3.367	1.44
193	-396.0	2.863	1.60
265	-416.2	1.982	1.97
289	-419.4	3.906	2.13
457	-372.6	3.332	2.80
601	-360.0	3.772	3.31
649	-347.0	2.309	3.50
697	-312.2	2.458	3.71
745	-348.5	2.089	3.89
793	-326.2	2.045	4.11
841	-312.0	1.322	4.31
889	-322.0	1.660	4.51
937	-305.2	0.956	4.73
1105	-303.7	1.176	5.45
1129	-295.1	2.769	5.63
1177	-299.4	1.880	5.92

Tabla A.1.22.- Concreto M4C-1 en solución salina de 5000 ppm de iones Cl⁻.

M4C-1			
ESPECÍMENES 1, 2 Y 3			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-769.9	133.706	0.23
2	-706.1	122.842	0.23
3	-469.5	110.440	0.32
4	-500.9	77.384	0.40
5	-489.2	38.051	0.45
25	-469.3	14.431	0.77
97	-406.2	8.366	1.05
121	-402.9	5.471	1.26
145	-411.4	7.182	1.41
193	-396.3	5.314	1.52
289	-368.2	5.448	1.66
433	-335.9	3.328	2.18
481	-318.4	3.127	2.37
529	-295.0	3.371	2.64
577	-305.3	4.449	2.93
625	-308.8	3.568	3.27
673	-333.0	5.172	3.51
721	-246.9	2.537	4.09
769	-228.1	2.450	4.33
937	-181.3	2.360	5.03
961	-193.7	1.510	5.23
1009	-205.5	2.478	5.53

Tabla A.1.23.- Concreto M4C-1 en solución salina de 15000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO M4C-1			
ESPECÍMENES 4, 5 Y 6			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-823.2	132.597	0.28
2	-754.9	121.155	0.16
3	-484.7	104.760	0.31
4	-498.7	68.483	0.42
5	-468.6	39.971	0.52
25	-461.1	18.467	0.79
97	-422.5	4.960	1.34
121	-416.2	6.329	1.41
145	-417.3	8.543	1.53
193	-408.4	8.181	1.74
289	-375.1	5.633	1.97
433	-347.7	2.753	2.85
481	-322.0	3.438	3.04
529	-295.8	3.308	3.24
577	-313.4	5.121	3.50
625	-319.4	4.150	3.66
673	-327.8	5.876	3.86
721	-249.8	3.300	4.15
769	-227.4	2.085	4.33
937	-186.7	1.459	5.04
961	-189.1	1.735	5.21
1009	-230.3	1.459	5.65

Tabla A.1.24.- Concreto M4C-1 en solución salina de 45000 ppm de iones Cl⁻.

CONCRETO M4C-1			
ESPECÍMENES 7, 8 Y 9			
Horas	Ecorr(mV)	Vc (μm/año)	ρ (KΩ-cm)
1	-817.6	140.530	0.16
2	-749.7	120.270	0.18
3	-510.4	107.321	0.29
4	-527.0	66.963	0.37
5	-503.4	38.09	0.54
25	-468.7	29.929	0.96
97	-412.2	5.629	1.43
121	-394.5	7.835	1.44
145	-400.7	8.291	1.62
193	-368.7	8.217	1.85
289	-341.1	6.793	2.39
433	-286.2	3.044	2.95
481	-252.1	2.871	3.20
529	-236.7	2.997	3.41
577	-264.1	3.859	3.63
625	-257.2	4.303	3.86
673	-262.3	3.768	4.08
721	-215.8	3.099	4.27
769	-209.0	4.917	4.47
937	-183.9	2.655	5.16
961	-184.7	1.892	5.35
1009	-243.0	1.365	5.85

ANEXO 2

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON.

Tabla A.2.1.- Resultados de la prueba a compresión del concreto con relación a/c de 0.4.

Mezcla	Edad de ensaye (días)	Espécimen	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Peso(kg)	Volumen (cm ³)	Peso volumétrico (kg/cm ³)	Carga máxima (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Promedio de resistencia a compresión (kg/cm ²)
MT1	7	M1-C1	151.0	299.3	12.315	5360.42	2297.39	79800.0	445.61	465.60
		M1-C2	151.7	305.0	12.755	5510.23	2314.78	85975.5	475.89	
		M1-C3	149.7	299.3	12.190	5266.17	2314.77	83621.2	475.31	
	14	M1-C4	149.0	300.0	12.215	5230.99	2335.12	86421.0	495.63	489.58
		M1-C5	150.0	300.0	12.245	5301.44	2309.75	86714.0	490.70	
		M1-C6	151.0	305.7	12.760	5473.84	2331.09	86391.0	482.42	
	28	M1-C7	150.0	300.0	12.350	5301.44	2329.56	91075.0	515.38	516.53
		M1-M2	151.7	299.3	12.410	5407.86	2294.81	93923.0	519.88	
		M1-M3	151.0	304.7	12.770	5455.93	2340.57	92105.4	514.33	
	90	M1-C8	150.0	300.0	12.250	5301.44	2310.69	114938.0	650.42	643.41
M1-M4		151.3	304.3	12.785	5474.05	2335.57	113654.0	631.87		
M1-M5		151.0	304.0	12.750	5443.99	2342.03	116033.0	647.94		

Tabla A.2.2.- Resultados de la prueba a compresión del concreto con relación a/c de 0.4 Y 5% de humo de sílice.

Mezcla	Edad de ensaye (días)	Espécimen	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Peso(kg)	Volumen (cm3)	Peso volumétrico (kg/cm3)	Carga máxima (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm2)	Promedio de resistencia a compresión (kg/cm2)
MT2	7	M2-C1	151.3	305.0	12.790	5486.04	2331.37	82199.0	456.99	465.81
		M2-C2	150.0	299.7	12.325	5295.55	2327.43	86567.6	489.87	
		M2-C3	150.0	299.7	12.385	5295.55	2338.76	79622.4	450.57	
	14	M2-C4	151.0	304.0	12.765	5443.99	2344.79	95400.0	532.73	510.87
		M2-C5	151.0	304.7	12.750	5455.93	2336.91	87100.0	486.38	
		M2-C6	151.0	304.7	12.745	5455.93	2335.99	91960.0	513.52	
	28	M2-C7	150.0	299.7	12.130	5295.55	2290.60	98149.1	555.41	560.18
		M2-M1	150.7	304.7	12.790	5431.87	2354.62	100731.0	564.99	
		M2-M2	150.7	304.0	12.745	5419.98	2351.48	99864.6	560.13	
	90	M2-C8	150.3	299.0	12.390	5307.28	2334.53	101194.0	570.10	589.54
M2-M4		149.3	299.7	12.295	5248.58	2342.54	103812.0	592.71		
M2-M6		151.0	304.0	12.780	5443.99	2347.54	108484.0	605.79		

Tabla A.2.3.- Resultados de la prueba a compresión del concreto con relación a/c de 0.5.

Mezcla	Edad de ensaye (días)	Espécimen	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Peso(kg)	Volumen (cm ³)	Peso volumétrico (kg/cm ³)	Carga máxima (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Promedio de resistencia a compresión (kg/cm ²)
MT3	7	M3-C1	151.3	304.3	12.500	5474.05	2283.50	57298.7	318.56	322.20
		M3-C2	149.7	299.3	12.095	5266.17	2296.73	57442.4	326.51	
		M3-C3	152.7	304.3	12.575	5570.93	2257.25	58859.5	321.54	
	14	M3-C4	152.0	305.0	12.610	5534.48	2278.44	66857.5	368.45	369.84
		M3-C5	152.0	304.0	12.545	5516.34	2274.15	68355.5	376.70	
		M3-C6	151.0	300.0	12.100	5372.36	2252.27	65250.6	364.37	
	28	M3-C7	151.0	305.0	12.555	5461.9	2298.65	73221.0	408.88	406.44
		M3-M1	151.0	304.3	12.605	5449.96	2312.86	73008.4	407.69	
		M3-M2	150.0	304.3	12.085	5378.01	2247.11	71173.8	402.76	
	90	M3-C8	148.7	298.3	11.900	5178.68	2297.88	75465.5	434.74	473.47
		M3-M4	151.3	303.7	12.595	5462.06	2305.91	89237.8	496.12	
M3-M5		151.0	300.0	12.185	5372.36	2268.09	87669.3	489.56		

Tabla A.2.4.- Resultados de la prueba a compresión del concreto con relación a/c de 0.6.

Mezcla	Edad de ensaye (días)	Espécimen	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Peso(kg)	Volumen (cm3)	Peso volumétrico (kg/cm3)	Carga máxima (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm2)	Promedio de resistencia a compresión (kg/cm2)
MT4	7	M4-C1	149.0	299.7	11.945	5225.18	2286.05	47100.0	270.12	272.72
		M4-C2	150.0	299.3	12.085	5289.66	2284.65	47800.0	270.49	
		M4-C3	151.0	303.3	12.425	5432.05	2287.35	49700.0	277.53	
	14	M4-C4	149.0	299.0	11.970	5213.55	2295.94	54713.0	313.78	309.35
		M4-C5	151.0	303.7	12.520	5438.02	2302.31	55647.0	310.74	
		M4-C6	151.3	298.7	12.010	5372.12	2235.62	54597.0	303.54	
	28	M4-C7	151.0	303.0	12.480	5426.08	2300.00	64013.9	357.46	348.65
		M4-M1	151.0	304.0	12.405	5443.99	2278.66	61860.8	345.44	
		M4-M3	150.0	299.3	12.060	5289.66	2279.92	60619.1	343.03	
	90	M4-C8	151.7	304.3	12.565	5498.19	2285.30	74395.7	411.79	409.16
M4-M4		151.0	304.0	12.520	5443.99	2299.78	73359.7	409.65		
M4-M5		151.3	304.0	12.525	5468.05	2290.58	73032.3	406.03		

Tabla A.2.5.- Resultados de la prueba a compresión del concreto con relación a/c de 0.4 y 1% de cloruros.

Mezcla	Edad de ensaye (días)	Espécimen	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Peso(kg)	Volumen (cm ³)	Peso volumétrico (kg/cm ³)	Carga máxima (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Promedio de resistencia a compresión (kg/cm ²)
M1C-1	7	M5-C1	152.3	300.3	12.220	5473.73	2232.48	72372.5	397.09	412.13
		M5-C2	152.0	305.0	12.670	5534.48	2289.28	76228.3	420.09	
		M5-C3	152.0	305.0	12.670	5534.48	2289.28	76070.4	419.22	
	14	M5-C4	149.0	299.3	12.060	5219.36	2310.63	76140.0	436.67	442.29
		M5-C5	149.0	299.3	12.045	5219.36	2307.75	81240.0	465.92	
		M5-C6	153.7	304.7	12.053	5650.33	2133.06	78690.0	424.30	
	28	M5-C7	151.0	304.0	12.550	5443.99	2305.29	86379.1	482.35	485.68
		M5-M1	151.0	299.3	12.180	5360.42	2272.21	87290.8	487.44	
		M5-M3	152.0	304.7	12.645	5528.43	2287.27	88416.0	487.25	
90	M5-C8	150.0	300.3	12.100	5307.33	2279.87	101739.0	575.72	578.26	
	M5-M4	149.3	299.3	11.945	5242.74	2278.39	102234.0	583.70		
	M5-M6	151.7	305.3	12.625	5516.26	2288.69	103947.0	575.36		

Tabla A.2.6. Resultados de la prueba a compresión del concreto con relación a/c de 0.4, 5% de humo de sílice del peso del cemento y el 1% de cloruros.

Mezcla	Edad de ensaye (días)	Espécimen	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Peso(kg)	Volumen (cm ³)	Peso volumétrico (kg/cm ³)	Carga máxima (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Promedio de resistencia a compresión (kg/cm ²)
M2C-1	7	M6-C1	149.0	300.0	12.065	5230.99	2306.45	69916.0	400.97	394.44
		M6-C2	151.0	305.0	12.505	5461.9	2289.50	69655.0	388.96	
		M6-C3	151.0	304.0	12.480	5443.99	2292.44	70447.0	393.39	
	14	M6-C4	151.0	304.0	12.560	5443.99	2307.13	82092.0	458.41	454.91
		M6-C5	151.0	305.0	12.505	5461.9	2289.50	81766.8	456.60	
		M6-C6	151.0	305.0	12.510	5461.9	2290.41	80534.6	449.72	
	28	M6-C7	152.7	305.3	12.565	5589.24	2248.07	90393.0	493.81	481.64
		M6-M1	151.7	305.7	12.560	5522.28	2274.42	86326.5	477.83	
		M6-M3	152.3	306.0	12.580	5577.01	2255.69	86258.1	473.28	
	90	M6-C8	149.0	299.3	12.000	5219.36	2299.13	96577.2	553.88	543.45
		M6-M4	149.0	299.7	12.050	5225.18	2306.14	94447.0	541.66	
		M6-M6	151.3	304.0	12.570	5468.05	2298.81	96199.5	534.83	

Tabla A.2.7. Resultados de la prueba a compresión del concreto con relación a/c de 0.5 y el 1% de cloruros.

Mezcla	Edad de ensaye (días)	Espécimen	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Peso(kg)	Volumen (cm3)	Peso volumétrico (kg/cm3)	Carga máxima (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm2)	Promedio de resistencia a compresión (kg/cm2)
M3C-1	7	M7-C1	151.7	305.0	12.635	5510.23	2293.01	57263.0	316.96	320.93
		M7-C2	149.0	298.0	11.950	5196.11	2299.80	57835.0	331.69	
		M7-C3	151.0	304.3	12.510	5449.96	2295.43	56256.0	314.14	
	14	M7-C4	152.0	304.7	12.535	5528.43	2267.37	65899.9	363.17	360.06
		M7-C5	151.0	304.7	12.565	5455.93	2303.00	62437.0	348.66	
		M7-C6	150.0	300.7	12.000	5313.22	2258.52	65093.1	368.35	
	28	M7-C7	151.0	305.3	12.605	5467.87	2305.29	73509.8	410.49	405.42
		M7-M2	151.0	304.3	12.858	5449.96	2359.28	73858.5	412.44	
		M7-M3	151.0	305.0	12.565	5461.9	2300.48	70437.2	393.33	
	90	M7-C8	151.0	301.3	12.245	5396.24	2269.17	84079.2	469.51	475.36
		M7-M4	151.0	304.7	12.530	5455.93	2296.58	87144.7	486.63	
		M7-M5	151.0	304.7	12.540	5455.93	2298.42	84158.6	469.95	

Tabla A.2.8.- Resultados de la prueba a compresión del concreto con relación a/c de 0.6 y el 1% de cloruros.

Mezcla	Edad de ensaye (días)	Espécimen	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Peso(kg)	Volumen (cm ³)	Peso volumétrico (kg/cm ³)	Carga máxima (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Promedio de resistencia a compresión (kg/cm ²)
M4C-1	7	M8-C1	151.0	299.7	12.110	5366.39	2256.64	45116.7	251.94	250.10
		M8-C2	152.0	305.0	12.415	5534.48	2243.21	44943.6	247.68	
		M8-C3	152.0	304.7	12.425	5528.43	2247.47	45491.1	250.70	
	14	M8-C4	151.0	304.0	12.480	5443.99	2292.44	51509.8	287.64	297.86
		M8-C5	151.0	304.0	12.480	5443.99	2292.44	53944.9	301.24	
		M8-C6	151.0	304.0	12.490	5443.99	2294.27	54566.7	304.71	
	28	M8-C7	151.7	305.0	12.450	5510.23	2259.43	59709.7	330.50	340.13
		M8-M2	150.3	304.7	12.400	5407.86	2292.96	59948.2	337.73	
		M8-M3	149.3	299.3	11.850	5242.74	2260.27	61677.2	352.14	
	90	M8-C8	151.7	305.0	12.545	5510.23	2276.67	65874.9	364.63	364.65
M8-M4		151.3	304.7	12.530	5480.04	2286.48	63215.8	351.45		
M8-M6		149.0	298.7	11.990	5207.74	2302.34	65888.9	377.88		

Tabla A.2.9.- Resultados de la prueba de Módulo de elasticidad y Relación de Poisson, a los 28 días.

Concreto	Espécimen	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad, E _c (kg/cm ²)	Relación de poisson	Deformación unitaria máxima, E _p
MT1	M1-M1	549.46	330690	0.29	0.0014
	M1-M2	519.97	316154	0.41	0.0013
	M1-M3	514.41	341481	0.32	0.0012
MT2	M2-M1	575.35	349866	0.26	0.0008
	M2-M2	570.51	350289	0.29	0.0008
	M2-M3	572.93	350078	0.27	0.0008
MT3	M3-M1	407.64	309684	0.29	0.0012
	M3-M2	402.76	299858	0.29	0.0012
	M3-M3	380.03	295064	0.14	0.0006
MT4	M4-M1	345.38	290501	0.31	0.0010
	M4-M2	326.39	292256	0.31	0.0010
	M4-M3	343.02	292330	0.25	0.0008
M1C-1	M5-M1	487.36	309621	0.31	0.0018
	M5-M2	487.34	309397	0.29	0.0013
	M5-M3	487.24	334179	0.31	0.0010
M2C-1	M6-M1	477.78	285450	0.31	0.0018
	M6-M2	476.80	302564	0.36	0.0026
	M6-M3	473.27	289532	0.26	0.0013
M3C-1	M7-M1	377.25	297003	0.28	0.0011
	M7-M2	412.42	297635	0.31	0.0014
	M7-M3	393.32	283236	0.26	0.0012
M4C-1	M8-M1	334.70	264512	0.39	0.0016
	M8-M2	347.48	275541	0.31	0.0013
	M8-M3	321.98	282383	0.30	0.0012

Tabla A.2.10.- Resultados de la prueba de Módulo de elasticidad y Relación de Poisson, a los 90 días.

Concreto	Espécimen	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad, E _c (kg/cm ²)	Relación de poisson	Deformación unitaria máxima, E _p
MT1	M1-M4	632.14	322109	0.27	0.0026
	M1-M5	647.97	345739	0.30	0.0027
	M1-M6	618.54	332233	0.26	0.0025
MT2	M2-M4	592.95	346550	0.28	0.0020
	M2-M5	612.83	381135	0.30	0.0020
	M2-M6	605.79	361291	0.28	0.0021
MT3	M3-M4	498.27	325365	0.28	0.0024
	M3-M5	489.52	305976	0.33	0.0024
	M3-M6	475.92	311394	0.28	0.0021
MT4	M4-M4	409.66	316200	0.32	0.0020
	M4-M5	410.46	305501	0.28	0.0021
	M4-M6	411.26	294801	0.25	0.0022
M1C-1	M5-M4	583.71	308316	0.26	0.0025
	M5-M5	595.29	345913	0.29	0.0022
	M5-M6	575.33	324346	0.32	0.0025
M2C-1	M6-M4	527.38	307835	0.29	0.0026
	M6-M5	474.64	277052	0.26	0.0023
	M6-M6	580.12	338619	0.32	0.0028
M3C-1	M7-M4	486.64	301910	0.30	0.0025
	M7-M5	469.98	306511	0.29	0.0024
	M7-M6	445.97	296505	0.29	0.0024
M4C-1	M8-M4	352.91	257070	0.19	0.0024
	M8-M5	371.36	256726	0.19	0.0024
	M8-M6	367.97	267758	0.26	0.0023