

Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil



Trabajo de Diploma

Montaje del protocolo de la Macrocelda para evaluar, en tiempo real, la corrosión del acero de refuerzo en hormigones fabricados con cemento LC³-50

***Autora:** Ana Estrella González Arbolaez.*

***Tutores:** Dr. Adrián Alujas Díaz*

Lic. Elizabeth Cabrera Apolinaire

Curso: 2016-2017

Pensamiento

La ciencia es respecto al alma lo que es la luz respecto de los ojos, y si las raíces son amargas, los frutos son muy dulces.

Aristóteles

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo con todo mi amor porque se lo merecen a:

A mi madre, porque solo con su sonrisa todo esto ya mereció la pena.

A ese hombre comprensivo y amable que ha sido un referente para mí, mi padre.

A mi hermana Yiney, que ha estado en los momentos que más la he necesitado brindándome su apoyo.

Gracias de todo corazón porque por ustedes llegué hasta aquí y por ustedes pienso seguir.

Agradecimientos

Quiero dar mis más sinceros agradecimientos a:

A mi madre amada, por apoyarme, ayudarme y llevarme de la mano en todo momento.

A mi hermana, que ha estado presente en toda mi formación.

A mi padre y mis hermanos, que siempre han confiado en mí.

A todas mis amigas, porque fueron un ejemplo a seguir para mí, y gracias a ellas estoy aquí.

A los impulsores de este gran motor, mis tutores Elizabeth y Adrián, que ha sabido guiarme hasta el final.

A Martirena, que confió en mi cuando todo estaba perdido.

A todos mis profesores, por haberme formado como la profesional que soy.

A Piti, que me ha brindado todo su amor y apoyo emocional, que, aunque no esté presente, su luz está guiándome.

A Mariceli y Rolando, que han sido como unos padres para mí.

A Artilés, que me formó como una verdadera ingeniera.

A Felipe y Yoel que me han brindado su ayuda incondicional en el laboratorio.

A mi adorado Jose.

*Para todo aquel que durante este tiempo estuvo a mi lado ayudándome y apoyándome llegue mi más sincero agradecimiento, **GRACIAS.***

Resumen

En el presente trabajo se realiza la propuesta y desarrollo del método de la Macrocelda como alternativa para la evaluación del grado de corrosión del acero de refuerzo, en tiempo real y bajo condiciones ambientales controladas, en hormigones fabricados con cemento LC³ y P-35. Para lograr este propósito se caracterizaron los materiales constituyentes del hormigón (cementos y áridos) y el hormigón en estado endurecido mediante los métodos de resistividad eléctrica, permeabilidad al aire y resistencia mecánica. Los hormigones producidos cumplen con la resistencia mecánica a la compresión y con la permeabilidad al aire según las normas NC 724-2009 y ASTM C1202 respectivamente, presentado alta resistencia y baja permeabilidad. Además, los hormigones producidos con P-35 muestran un alto riesgo y velocidad de corrosión a los 7 y 28 días, no así para el caso de los fabricados con LC³ que presentan un riesgo moderado y una velocidad de corrosión baja o moderada. Los valores de corriente medidos por el método de la Macrocelda dependen del recubrimiento de las barras de acero, siendo estos valores mayores mientras menor es el recubrimiento debido a una mayor exposición del acero a las condiciones ambientales. Por otra parte, el hormigón del P-35 presenta un mayor grado de corrosión con un mismo recubrimiento (30mm), sin embargo, a los 15mm ambos hormigones presentan un comportamiento similar.

Abstract

In this work is made the proposal and development of the method of Macroelda as an alternative for the evaluation of the degree of corrosion of reinforcing steel, in real time and under controlled environmental conditions, in concrete made with LC3 and P-35 cements. Concrete materials (cement and aggregates) and concrete in the hardened state were characterized by the methods of electrical resistivity, air permeability and mechanical strength. The concrete produced complies with the mechanical strength and with the air permeability test according to the NC 724-2009 and ASTM C1202 standards respectively, they presented high strength and low permeability. In addition, concrete produced with P-35 shows a high risk and corrosion rate at 7 and 28 days, but not for those made with LC3 because it presents a moderate risk and a low or moderate corrosion rate. The current values measured by the Macroelda method depends on the coating of the steel bars, being these values higher in the lower coating due to a higher exposure of the steel to the ambiental conditions. On the other hand, the concrete of the P-35 presents a greater degree of corrosion with a same coating (30mm) nevertheless; to 15mm, both concretes present a similar behavior.

Índice

Introducción	1
Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado	6
1.1 Hormigón hidráulico	6
1.1.1 Características físicas del hormigón	8
1.2 Cemento Portland	9
1.3 Cemento con adiciones minerales. Cemento de bajo carbono LC ³	10
1.4 Durabilidad de las estructuras de hormigón	12
1.4.1 Factores que afectan la durabilidad del hormigón armado	13
1.5 Corrosión del acero de refuerzo	15
1.5.1 Corrosión del acero por iones cloruros	19
1.5.2 Corrosión del acero por Carbonatación	20
1.5.3 Factores que propician la corrosión	23
1.5.4 Determinación de la profundidad de carbonatación	25
1.6 Métodos para evaluar el grado de corrosión	26
1.6.1 Técnicas electroquímicas para estimar el estado de corrosión del refuerzo	28
1.6.2 Modelo de corrosión de macroceldas	30
1.7 Conclusiones parciales del capítulo:	33
Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocela para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP- 35 y LC ³	35
2.1 Diseño experimental de mezclas de hormigón para especímenes	35
2.2 Caracterización de los materiales constituyentes del hormigón	35
2.2.1 Cementos	35
2.2.2 Áridos	38
2.2.3 Aditivo	41
2.2.4 Agua de amasado	42
2.3 Aceros	43
2.3.1 Preparación de las barras de acero	44
2.4 Fabricación del hormigón	49
2.4.1 Dosificación de las mezclas de hormigón empleadas	49
2.4.2 Producción de hormigón	49

Índice

2.4.3 Moldes empleados	50
2.4.4 Llenado de probetas, compactación y conservación.....	51
2.5 Ensayos al hormigón en estado fresco.....	52
2.5.1 Consistencia.....	52
2.6 Ensayos al hormigón en estado endurecido.....	54
2.6.1 Resistencia mecánica a compresión a edades de 7 y 28 días.....	54
2.6.2 Resistividad a edades 7 y 28 días (Family, 2015)	55
2.6.3 Permeabilidad al aire a edades 7 y 28 días (SIA_262/1, 2003)	57
2.7 Protocolo de la Macrocela. Metodología propuesta.....	58
2.7.1 Ensayo de la macrocela. Procedimiento y desarrollo (Elsener et al., 2003) 60	
Capítulo III: Evaluación del grado de corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón fabricados con LC ³ - 50 y P-35	62
3.1 Ensayos del hormigón en estado fresco	62
3.2 Ensayos del hormigón endurecido	64
3.2.1 Resistencia a compresión.....	64
3.2.3 Resistividad	65
3.3 Resultados previos del protocolo de la Macrocela	66
Conclusiones Generales	71
Recomendaciones	72
Referencias bibliográficas	73

Introducción

Introducción

El hormigón en masa es un material moldeable y con buenas propiedades mecánicas y de durabilidad, y aunque resiste tensiones y esfuerzos de compresión apreciables tiene una resistencia a la tracción muy reducida. Para resistir adecuadamente esfuerzos de torsión es necesario combinar el hormigón con un esqueleto de acero. Este esqueleto tiene la misión resistir las tensiones de tracción que aparecen en la estructura, mientras que el hormigón resistirá la compresión, de ahí la denominación de hormigón armado (Pérez, 2010) .

El hormigón reforzado con varillas de acero es uno de los materiales de construcción más ampliamente empleados, sin embargo, las estructuras que los emplean tienen el inconveniente de ser susceptibles a la corrosión. El problema del deterioro de las estructuras de concreto debido a procesos de corrosión es serio y de implicaciones económicas mayores. La habilidad para evaluar la corrosión de las varillas de refuerzo en estructuras y poder estimar la vida en servicio remanente es tema de estudios en el ámbito mundial (González and Miranda, 2007).

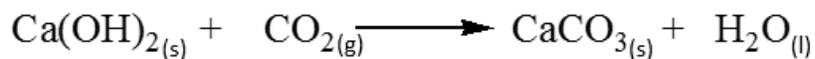
Globalmente existe un enfoque en los estudios sobre la durabilidad de las estructuras de hormigón armado, ya que son periódicas las inversiones que se generan por los deterioros que surgen en ellas, afectando su vida útil y la economía de los propietarios.

La NC 250:2005 *“Requisitos de durabilidad para el diseño y construcción de edificaciones y obras civiles de hormigón estructural”* (NC_250, 2005), define la durabilidad como la capacidad del hormigón para soportar, durante la vida útil para la que ha sido diseñado, las condiciones físicas y químicas a las que va a estar expuesto.

En Cuba puede apreciarse el deterioro de las estructuras que se encuentran expuestas a la acción de diferentes agentes químicos. Ya sea por las condiciones geográficas del país, al estar rodeada de mar (isla), donde el ataque por penetración

Introducción

de cloruros, nitratos y sulfatos en el hormigón se hace inevitable, o por el proceso de carbonatación, el cual resulta de una reacción química en la que el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), presente en la pasta de cemento, reacciona con el dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera, y forma carbonato de calcio (CaCO_3); siendo este una de las condicionantes del proceso corrosivo del acero de refuerzo en las estructuras de hormigón armado. A continuación, la reacción química que describe el proceso de corrosión por carbonatación:



Generalmente, el fenómeno de la carbonatación, es un proceso físico-químico complejo que modifica lentamente en el tiempo la estructura del concreto, induciendo a cambios en sus propiedades físicas durante el avance del factor tiempo. La carbonatación penetra a través de los poros del concreto hasta alcanzar y despasivar al acero de refuerzo, ya que disminuye la alcalinidad que mantiene protegida a la varilla de acero de refuerzo, produciendo una herrumbre que se expande hacia la armadura, proceso que termina por hacer “explotar” y desprender el hormigón que la recubre. A partir de este instante, la varilla de acero pierde parte de su sección transversal original y con el tiempo, puede conducir al deterioro de la propia estructura. Este momento es conocido por los especialistas como avance del frente de carbonatación (del Valle Moreno et al., 2001).

El grado de carbonatación en el hormigón, está influenciado principalmente por la permeabilidad y por el contenido de calcio en la mezcla de concreto; aunque también son significativas las condiciones medioambientales y atmosféricas, tales como: la cantidad de CO_2 , la humedad relativa y la temperatura. Es importante destacar que la carbonatación produce una pérdida significativa del pH del concreto, lo cual constituye un serio problema desencadenante del proceso de corrosión. El concreto, con su ambiente altamente alcalino (rango de pH de 12 a 13), protege al acero de refuerzo contra la corrosión, lográndose por la formación de una capa de

Introducción

óxido de hierro pasivo sobre la superficie del acero, que permanece estable en el ambiente altamente alcalino. Cuando progresa la carbonatación hacia la profundidad del refuerzo, la capa de óxido protectora y pasivadora deja de ser estable. A este nivel de pH (por debajo de 9.5), es posible que comience el proceso corrosivo, afectando significativamente las características funcionales del hormigón armado tales como la adherencia, además de inducir la formación de agrietamientos y desprendimientos de fragmentos de hormigón, lo que compromete la integridad estructural (Babiche, 2010).

Por tales motivos, se han desarrollado métodos de predicción de la vida útil de las estructuras, como ensayos de laboratorio que evalúen en tiempo real y en condiciones controladas, el grado de corrosión de las estructuras de hormigón reforzado.

Como parte del estudio de la durabilidad del nuevo cemento de bajo carbono LC³, propuesto y desarrollado por el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM), en colaboración con un equipo técnico de la Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza, se hace necesario estudiar el comportamiento del mismo ante el grado de corrosión del acero de refuerzo de hormigones armados. Los métodos de ensayos existentes hasta el momento, constituyen métodos destructivos o resulta difícil la interpretación de sus resultados. Es por ello que el método basado en el funcionamiento de la macrocelda constituye una alternativa viable para evaluar el efecto de la corrosión en tiempo real y bajo condiciones ambientales controladas.

En consideración, se asume como **problema científico**: ¿Cómo evaluar en tiempo real y bajo condiciones ambientales controladas, la corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón elaborados con cementos LC³?

Introducción

Objetivo general:

Desarrollar el método de la Macrocela para evaluar, en tiempo real y bajo condiciones ambientales controladas, la corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón elaborados con cementos LC³.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar los materiales empleados en la fabricación de los hormigones hidráulicos producidos con cemento LC³ y P-35.
2. Elaborar una propuesta de procedimiento para evaluar en tiempo real el grado de corrosión del acero en especímenes de hormigón por el método de la Macrocela.
3. Evaluar la influencia del recubrimiento sobre el grado de corrosión del acero de refuerzo producidos con cemento LC³ y P-35.

Tareas de investigación:

1. Revisión de la literatura científica publicada acerca del mecanismo de corrosión debido a la carbonatación de hormigones armados, así como los factores que influyen en este efecto y los principales métodos empleados para determinar el grado de corrosión.
2. Caracterización de los materiales constituyentes empleados en los hormigones producidos.
3. Diseño del protocolo de la macrocela para evaluar el estado de corrosión del acero en los especímenes fabricados con cemento LC³ y P-35.

Introducción

Novedad científica: La aplicación de los estudios de corrosión del acero de refuerzo en hormigón de LC³, en tiempo real y condiciones ambientales controladas empleado el método de la Macrocela.

Contribución científico-técnico: La aplicación del método de la Macrocela, en tiempo real y condiciones ambientales controladas, para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo, permite valorar el comportamiento de hormigones fabricados con un cemento de bajo carbono LC³, contribuyendo de esta forma a la incursión de este tipo de estudio en nuestro país, particularmente en el CIDEM.

Estructura del Trabajo de Diploma:

- ✓ **Resumen**
- ✓ **Introducción:** Se detallan los elementos metodológicos e investigativos de la presente investigación.
- ✓ **Capítulo I:** Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo, en el hormigón armado.
- ✓ **Capítulo II:** Aplicación del protocolo de la Macrocela para la evaluación de la corrosión de especímenes de hormigón armado, fabricados con cemento P-35 y LC³-50.
- ✓ **Capítulo III:** Evaluación del grado de corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón fabricados con LC³- 50 y P-35.
- ✓ **Conclusiones**
- ✓ **Recomendaciones**
- ✓ **Referencias bibliográficas**

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

En el capítulo se argumentan temas relacionados con la composición y comportamiento del hormigón hidráulico, como: materiales constituyentes, la resistencia mecánica y durabilidad ante la carbonatación, y esencialmente los ensayos y métodos actuales de evaluación de la corrosión en especímenes de hormigón reforzado.

1.1 Hormigón hidráulico

El hormigón ha sido el material de construcción más empleado por el hombre desde los romanos, dado a sus propiedades resistentes, tanto ante las acciones de las cargas como al medio ambiente.

La norma cubana NC 120:2014 (NC_120, 2014) "*Hormigón Hidráulico. Especificaciones*" define al hormigón hidráulico como el material formado por la mezcla de cemento, árido grueso y árido fino, agua con o sin la incorporación de aditivos o adiciones, que desarrolla sus propiedades por la hidratación del cemento.

La pasta formada por cemento y agua es la que confiere al hormigón su fraguado y endurecimiento, mientras que el árido es un material inerte sin participación directa en el fraguado y endurecimiento del hormigón. El cemento se hidrata en contacto con el agua, iniciándose diversas reacciones químicas de hidratación que lo convierten en una pasta maleable con buenas propiedades adherentes, que, en el transcurso de unas horas, derivan en el fraguado y endurecimiento progresivo de la mezcla, obteniéndose un material de consistencia pétreo.

Una característica importante del hormigón es poder adoptar formas distintas, a voluntad del proyectista. Al colocarse en obra es una masa plástica que permite rellenar un molde, previamente construido con una forma establecida, que recibe el nombre de encofrado (Betancourt, 2013).

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

La principal característica estructural del hormigón es resistir muy bien los esfuerzos de compresión. Sin embargo, tanto su resistencia a tracción como al esfuerzo cortante son relativamente bajas, por lo cual se debe utilizar en situaciones donde las sollicitaciones por tracción o cortante sean muy bajas. Para determinar la resistencia se preparan ensayos mecánicos (*ensayos de rotura*) sobre probetas de hormigón.

Para superar este inconveniente, se "arma" el hormigón introduciendo barras de acero, conocido como hormigón armado, o concreto reforzado, permitiendo soportar los esfuerzos cortantes y de tracción con las barras de acero. Es usual, además, disponer barras de acero reforzando zonas o elementos fundamentalmente comprimidos, como es el caso de los pilares. Los intentos de compensar las deficiencias del hormigón a tracción y cortante originaron el desarrollo de una nueva técnica constructiva a principios del siglo XX, la del hormigón armado. Así, introduciendo antes del fraguado alambres de alta resistencia tensados en el hormigón, este queda comprimido al fraguar, con lo cual las tracciones que surgirían para resistir las acciones externas, se convierten en descompresiones de las partes previamente comprimidas, resultando muy ventajoso en muchos casos. Para el pretensado se utilizan aceros de muy alto límite elástico, dado que el fenómeno denominado fluencia lenta anularía las ventajas del pretensado. Posteriormente se investigó la conveniencia de introducir tensiones en el acero de manera deliberada y previa al fraguado del hormigón de la pieza estructural, desarrollándose las técnicas del hormigón pretensado y el hormigón postensado (del Valle Moreno et al., 2001).

Los aditivos permiten obtener hormigones de alta resistencia; la inclusión de monómeros y adiciones para hormigón aportan múltiples mejoras en las propiedades del hormigón.

Cuando se proyecta un elemento de hormigón armado se establecen las dimensiones, el tipo de hormigón, la cantidad, calidad, aditivos, adiciones y disposición del acero que hay que aportar en función los esfuerzos que deberá

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

resistir cada elemento. Un diseño racional, la adecuada dosificación, mezcla, colocación, consolidación, acabado y curado, hacen del hormigón un material idóneo para ser utilizado en construcción, por ser resistente, durable, incombustible, casi impermeable, y requerir escaso mantenimiento. Como puede ser moldeado fácilmente en amplia variedad de formas y adquirir variadas texturas y colores, se utiliza en multitud de aplicaciones (Betancourt, 2013).

1.1.1 Características físicas del hormigón

Las principales características físicas del hormigón, en valores aproximados, son:

- Densidad: en torno a 2350 kg/m³
- Resistencia a compresión: de 150 a 500 kg/cm² (15 a 50 MPa) para el hormigón ordinario. Existen hormigones especiales de alta resistencia que alcanzan hasta 2000 kg/cm² (200 MPa).
- Resistencia a tracción: proporcionalmente baja, es del orden de un décimo de la resistencia a compresión y, generalmente, poco significativa en el cálculo global.
- Tiempo de fraguado: dos horas, aproximadamente, variando en función de la temperatura y la humedad del ambiente exterior.
- Tiempo de endurecimiento: progresivo, dependiendo de la temperatura, humedad y otros parámetros.
 - De 24 a 48 horas, adquiere la mitad de la resistencia máxima; en una semana 3/4 partes, y en 4 semanas prácticamente la resistencia total de cálculo.
- Dado que el hormigón se dilata y contrae en magnitudes semejantes al acero, pues tienen parecido coeficiente de dilatación térmico, resulta muy útil su uso simultáneo en obras de construcción; además, el hormigón protege al acero de la oxidación al recubrirlo.

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

La resistencia a compresión se comprueba en probetas ensayadas en prensas hidráulicas a diferentes edades, en especial a 28 días de fabricado el hormigón, según la necesidad del cliente se puede desarrollar en edades tempranas o posteriores a ese tiempo (NC_120, 2014).

1.2 Cemento Portland

Los cementos son productos que amasados con agua fraguan y endurecen formándose nuevos compuestos resultantes de reacciones de hidratación que son estables tanto al aire como sumergidos en agua. Hay varios tipos de cementos, las propiedades de cada uno de ellos están íntimamente asociadas a la composición química de sus componentes iniciales.

Además del tipo de cemento, el segundo factor que determina la calidad del cemento, es su clase o resistencia a compresión a 28 días. Esta se determina en un mortero normalizado y expresa la resistencia mínima, la cual debe ser siempre superada en la fabricación del cemento. No es lo mismo, ni debe confundirse la resistencia del cemento con la del hormigón, pues la del cemento corresponde a componentes normalizados y la del hormigón dependerá de todos y cada uno de sus componentes.

El cemento Portland se obtiene al calcinar a unos 1500 °C mezclas preparadas artificialmente de calizas y arcillas. El producto resultante, llamado clínker, se muele añadiendo una cantidad adecuada de regulador de fraguado, que suele ser piedra de yeso natural (UMACON, 2016).

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

Según la (NC_120, 2014), se clasifica el cemento en tres grados de calidad de acuerdo a su resistencia a compresión a los 28 días expresada en MPa:

a) Portland 35: P - 35

b) Portland 45: P - 45

c) Portland 55: P – 55

La selección del tipo de cemento depende de las características de la ejecución de la obra, el uso final del hormigón, las condiciones del curado (tratamiento térmico), dimensiones de la estructura (calor de hidratación), condiciones ambientales de exposición de la estructura y la reactividad potencial de los áridos con los álcalis procedentes del resto de los constituyentes.

La industria productora de cemento es la responsable entre un 7 y 8% de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera, asociadas a la descomposición química del carbonato de calcio (CaCO_3) durante la producción del clínker, constituyendo este producto el componente principal del cemento. Hoy surgen varias alternativas para disminuir la contaminación ambiental, dentro de ellas el uso de materiales cementicios suplementarios (MCS), los cuales, adicionados al cemento, disminuyen el empleo del clínker en los cementos Portland (Martirena, 2003).

1.3 Cemento con adiciones minerales. Cemento de bajo carbono LC³

Los materiales cementicios suplementarios, se emplean con el objetivo de lograr una reducción de las emisiones de CO_2 a la atmósfera, las cuales están estrechamente asociadas a la producción del clínker, constituyendo una alternativa viable para lograr una sustitución parcial del clínker, en el proceso de producción del Cemento Portland (Laffely and Scrivener, 2014).

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

Una puzolana natural (tales como las cenizas volcánicas) o artificial (subproductos industriales o agrícolas), puede ser utilizada como material cementicio suplementario, al contener principalmente en su composición química óxidos de sílice y de aluminio. Esto les da un carácter ácido, por tanto, una gran afinidad por la cal (tendencia a combinarse con la cal en presencia de agua a temperatura ambiente). La puzolana por si misma posee un valor cementante nulo o muy pequeño, no obstante, cuando la puzolana se emplea en combinación con el cemento Portland, reacciona con el hidróxido de calcio de este a través de una reacción secundaria a la reacción de hidratación de los componentes principales del cemento, para formar compuestos cementantes (Martirena, 2003).

El humo de sílice constituye un material puzolánico altamente eficaz debido a su extrema finura y alto contenido de sílice, aumenta la resistencia del hormigón a edades tempranas y también reduce la permeabilidad. Mientras la ceniza volante tiende a limitar la velocidad de reacción, por tanto, requiere de mayor período de tiempo para mejorar el completamiento de la estructura de poros. El uso de las cenizas volantes mejora zonas de la interface de transición (ITZ) entre la matriz de cemento y el agregado, conducente a una reducción en la porosidad. Las escorias dan una reacción de hidratación lenta, permite la sustitución de cemento por altos contenidos de estas, aunque pueden tener un efecto negativo sobre la resistencia y la porosidad a edades tempranas. El metacaolín es una puzolana eficaz con alta velocidad de reacción, genera resultados mejores de la resistencia del hormigón. La zeolita como una puzolana natural, provoca altas resistencias a largo plazo y bajo calor de hidratación, pero con la desventaja de baja resistencia inicial en morteros y hormigones. La zeolita a pesar de aumentar el número de microporos, disminuye la cantidad de poros grandes (Alujas et al., 2010).

Como expresa Alujas y demás autores (Alujas et al., 2010), las cantidades de las adiciones del Tipo I -aproximadamente inertes y del Tipo II - puzolánicas o

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

hidráulicamente activas a utilizar en el hormigón, deben ser objeto de ensayos preliminares. Se debe tener en cuenta no solo la influencia de la adición y cantidad en las propiedades mecánicas del hormigón, sino también en las propiedades durables que pueda presentar.

Una variante aplicada en Cuba para disminuir el uso del clínquer en la producción de cemento Portland, consiste en la sustitución de parte del clínquer del cemento Portland por materiales cementicios suplementarios, como arcilla-calcinada, caliza y yeso, donde los porcentajes de clínquer y estos materiales son básicamente en 48; 30; 15 y 7 respectivamente. El producto final es denominado cemento de bajo carbono LC³ y permite lograr reducciones de las emisiones asociadas a la producción de cemento entre un 25 – 35 % con respecto a la práctica diaria sobre la base de la sustitución de clínquer, sin embargo son más sensibles a la carbonatación en comparación con el cemento Portland debido fundamentalmente a su menor contenido de portlandita, además el comportamiento ante la penetración de cloruros en morteros fabricados a partir de la serie de cemento con 45 % de adición de arcilla calcinada, caliza es 10 veces superior que en los morteros de cemento Portland (VIZCAÍNO, 2014).

1.4 Durabilidad de las estructuras de hormigón

La durabilidad de las estructuras de hormigón armado está asociada a los procesos de degradación del hormigón y del acero, como consecuencia de causas diferentes a las cargas y sollicitaciones contempladas en el proyecto. Para abordar el diseño de estructuras durables, se deben tener en cuenta todos los posibles mecanismos de degradación que puedan afectarla, así como los diferentes niveles de exposición que vayan a incidir sobre cada elemento estructural.

La durabilidad del hormigón de cemento hidráulico se define como su capacidad para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro.

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

Una estructura durable debe conseguirse con una estrategia capaz de considerar todos los posibles factores de degradación y actuar consecuentemente sobre cada una de las fases de proyecto, ejecución, uso y mantenimiento de la estructura. En la fase de proyecto se deben tomar decisiones que, de ser omitidas o erróneas, conducirán a una obra no durable o encarecerá notablemente la ejecución mediante obras de reparación o sustitución que se realizarán a posteriori. Las decisiones vendrán a determinar, entre otros parámetros, el espesor de los recubrimientos, el valor de la anchura admisible de fisuras, especificación del tipo y clase de cemento dependiendo del ambiente en el que se ejecute la estructura, etc. (Pérez, 2010).

1.4.1 Factores que afectan la durabilidad del hormigón armado

La buena calidad de la ejecución de la obra y, especialmente, del proceso de curado, tiene una influencia decisiva para conseguir una estructura durable. Una estrategia enfocada a la durabilidad de una estructura debe conseguir una calidad adecuada del hormigón, en especial en las zonas más superficiales donde se pueden producir los procesos de deterioro.

Por tanto, no solo hay que considerar los efectos provocados por las cargas y solicitaciones, sino también las condiciones físicas y químicas a las que se expone. Por ello se considera el tipo de ambiente en que se va a encontrar la estructura y que puede afectar a la corrosión de las armaduras, ambientes químicos agresivos, zonas afectadas por ciclos de hielo-deshielo, etc. (Scrivener, 2007).

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

Los principales factores físico-químicos que limitan la durabilidad del hormigón son:

1.- Ciclos de hielo-deshielo: Los continuos ciclos de dilatación y contracción del agua contenida en los poros y capilares del hormigón, producen tensión interna que acaban fisurando este elemento, debido a la escasa resistencia a fuerzas de tracción. La correcta utilización de aditivos inclusores de aire reduce la frecuencia y severidad de los daños producidos por este fenómeno.

2.- Ciclos térmicos y de humedad: Los cambios drásticos en temperatura y humedad producen variaciones de volumen que acaban por fisurar el hormigón.

3.- Iones sulfato: Los medios que contienen iones sulfatos, como el agua del mar, reaccionan químicamente con diversos componentes del hormigón, transformándose en etringita o sal de Canlot, lo que produce un aumento de volumen y la fractura interna del hormigón. La utilización de cemento Portland antisulfatos o la adición de yeso durante el fraguado minimizan los efectos negativos de los iones.

4- Medios ácidos: Debido a la alcalinidad de los cementos, el hormigón reacciona con la mayoría de los medios ácidos, minerales, etc. El CO_2 reacciona con facilidad para transformarse en CaCO_3 obturando los poros del hormigón. Esto resulta muy perjudicial para las armaduras ya que el frente carbonatado llega hasta ellas, produciendo la despasivación de éstas. La reducción de la penetrabilidad del hormigón con bajas relaciones a/c (relación agua/cemento), la buena compactación, el correcto vibrado y la buena realización del curado, disminuyen la penetración de elementos dañinos en el hormigón.

5.- Reacciones expansivas: Una proporción elevada de óxido de magnesio (MgO) inicial, a causa de su hidratación lenta y expansiva, van deteriorando el hormigón. Una vez endurecido, la presencia de MgO puede causar problemas al reaccionar

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

con la disolución de poro del hormigón. Se deberá controlar el contenido de MgO en las materias primas.

6.- Corrosión de armaduras: Las armaduras deberán permanecer exentas de corrosión durante todo el período de vida útil de la estructura.

Para garantizar la durabilidad del hormigón y la protección de las armaduras frente a la corrosión es importante realizar un hormigón con una permeabilidad reducida, realizando una mezcla con una relación agua/cemento baja, una compactación idónea, un peso en cemento adecuado y la hidratación suficiente de éste añadiendo agua de curado para completarlo. De esta forma se consigue que haya la menor cantidad de poros posibles y una red capilar interna poco comunicada y así se reducen los ataques al hormigón. En los casos de existencia de sulfatos en el terreno o de agua de mar se deben emplear cementos especiales. Para prevenir la corrosión de armaduras hay que cuidar el recubrimiento mínimo de las mismas (Bello, 2013).

1.5 Corrosión del acero de refuerzo

La corrosión se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. Por este proceso los metales pasan de su estado elemental, a su estado combinado que presentan en la naturaleza, formando compuestos con otros elementos, como óxidos, sulfuros, entre otros. Esta reacción, mediante la cual el metal se transforma, se produce mediante una reacción espontánea. Este proceso, en el que se produce la oxidación del elemento, se conoce como corrosión y representa la disminución paulatina del volumen del metal.

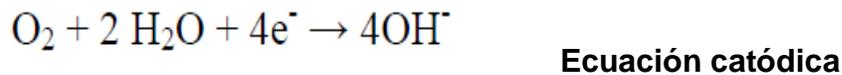
Si la corrosión metálica tiene lugar en un medio acuoso, se trata de un fenómeno de carácter electroquímico. En este contexto, se produce una reacción de oxidación y otra de reducción.

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

En el ánodo se produce la oxidación del hierro, al estado de óxido ferroso, desprendiendo electrones, respondiendo a la siguiente reacción:



En el cátodo, el oxígeno disuelto en el agua se combina con los electrones suministrados por el ánodo dando lugar a la formación de iones hidroxilo:



Los iones hidroxilo son transportados al ánodo combinándose con los cationes Fe^{2+} , formándose hidróxido de hierro (II): (Broomfield, 1997)

Tabla 1.1 Reacciones de transformación del hierro en el acero durante la oxidación

$\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$	Formación de hidróxido ferroso
$4\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3$	Formación de hidróxido férrico
$2\text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$	Formación de óxido de hierro hidratado

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

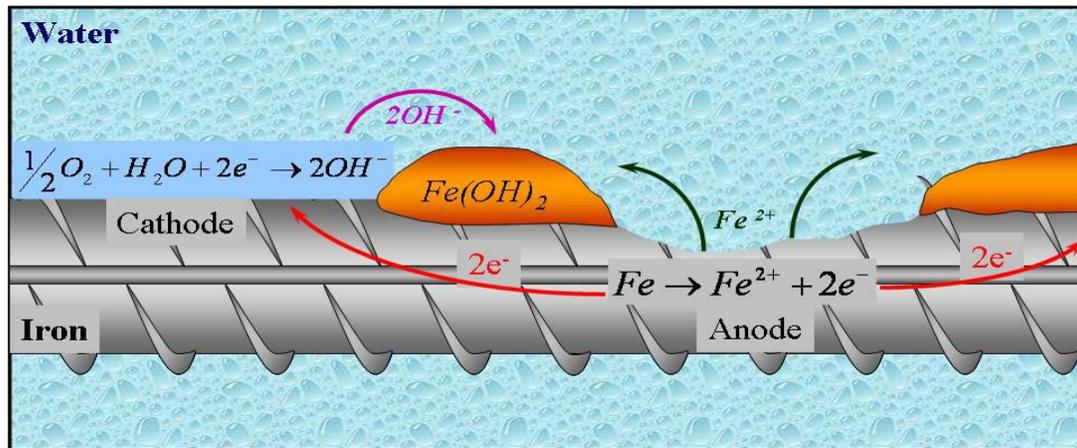


Fig. 1.1 Descripción gráfica del proceso de corrosión del acero de refuerzo en el hormigón armado.

Los diagramas de Pourbaix nos dan idea del estado en el que se encuentran los metales y disoluciones, en función de los cambios en el pH y el potencial.

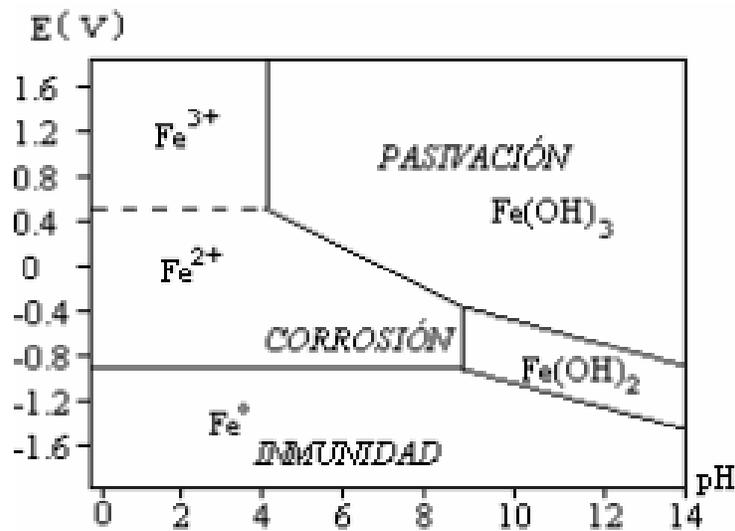


Fig. 1.2 Diagrama de Pourbaix del Fe a 25°C (del Valle Moreno et al., 2001).

Fuente: Secretaría de comunicaciones y transportes del Instituto Mexicano del Transporte. Publicación técnica nº 182. (2001).

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

En el gráfico se definen las zonas en las que las especies químicas pueden estar como sólidos insolubles (Fe , $\text{Fe}(\text{OH})_2$ y $\text{Fe}(\text{OH})_3$) y solubles, como iones (Fe^{2+} y Fe^{+3}).

Las líneas horizontales separan semirreacciones donde el potencial no varía en función del pH del medio. Si en el sistema existe una especie con un potencial de reducción mayor que el que determina la línea, la especie oxidada permanecerá estable.

Las líneas verticales separan reacciones que no son de tipo redox y son independientes de cualquier par redox (oxidación-reducción) que esté presente. Estas reacciones son dependientes del pH del medio, por lo que la línea de separación será vertical.

Las líneas inclinadas dividen zonas de reacciones redox donde intervienen protones. Por lo tanto, el potencial depende del pH de la disolución.

La distribución de zonas es la siguiente:

- Zona de pasividad: Los hidróxidos de hierro forman una capa protectora en la superficie del metal, que reduce su actividad química y por lo tanto su velocidad de corrosión, por ello se le denomina zona de pasividad.
- Zona de inmunidad: En esta región del diagrama la especie termodinámicamente estable es el Fe^0 (metálico), por lo tanto, el metal es inmune y no sufre corrosión.
- Zona de corrosión: Las especies estables del hierro se encuentran como iones, por lo tanto, es una condición propicia para la disolución del metal (del Valle Moreno et al., 2001).

De acuerdo a la cantidad de área corroída, se pueden considerar dos tipos de corrosión: la localizada, que se caracteriza por la destrucción local de la capa

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

pasivante debido a la acción de un agente agresivo. La causa más frecuente que induce este tipo de corrosión es la presencia de iones despasivantes, tales como los cloruros, que al superar un determinado valor crítico rompen localmente la capa pasivante.

Otro tipo de corrosión es la generalizada y se caracteriza por un ataque uniforme en toda la superficie del acero debido a un descenso de la alcalinidad en el hormigón que rompe la capa pasiva al llegar al acero. Puede ser debido a un deslavado por circulación de aguas puras o ligeramente acidas o por la reacción de compuestos de carácter básico presentes en el hormigón con componentes ácidos presentes en la atmósfera, siendo la carbonatación el fenómeno más frecuente (González and Miranda, 2007).

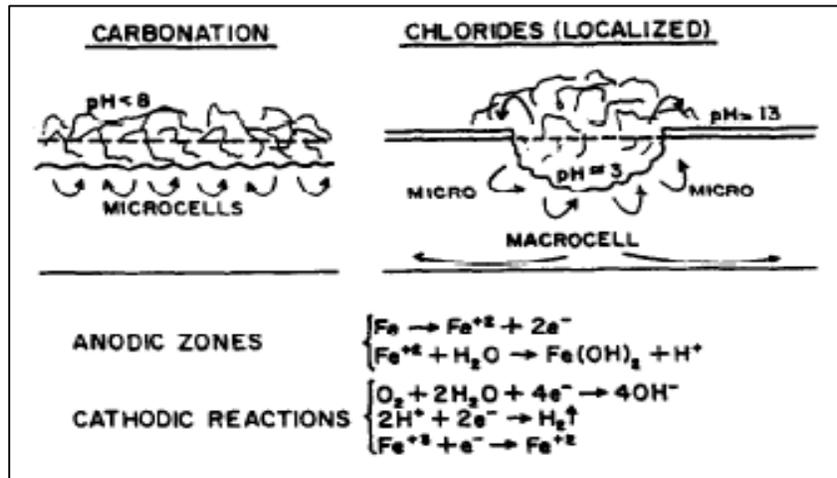


Fig. 1.3 Corrosión generalizada y localizada en armaduras de acero. Creación de microceldas y macroceldas de corrosión (Broomfield, 1997).

1.5.1 Corrosión del acero por iones cloruros

En el caso de corrosión por cloruros, la película pasiva se rompe sólo en áreas pequeñas (corrosión por picaduras). Esto sucede en las zonas de mayor concentración de electrones, como son las soldaduras, fisuras o uniones de barras.

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

La presencia de cloruros se debe a diferentes vías, ya sean añadidos al hormigón como aditivos, o en las sales para provocar el deshielo en redes varias, o bien porque contenga el medio ambiente y penetren por difusión como en las zonas costeras.

Los cloruros son transportados desde la superficie hasta la armadura a través del agua de la estructura de poros. De esta manera, se forma una celda de corrosión con una zona catódica en el cual se da el proceso de reducción y un área anódica pequeña, la picadura, donde se disuelve el acero.

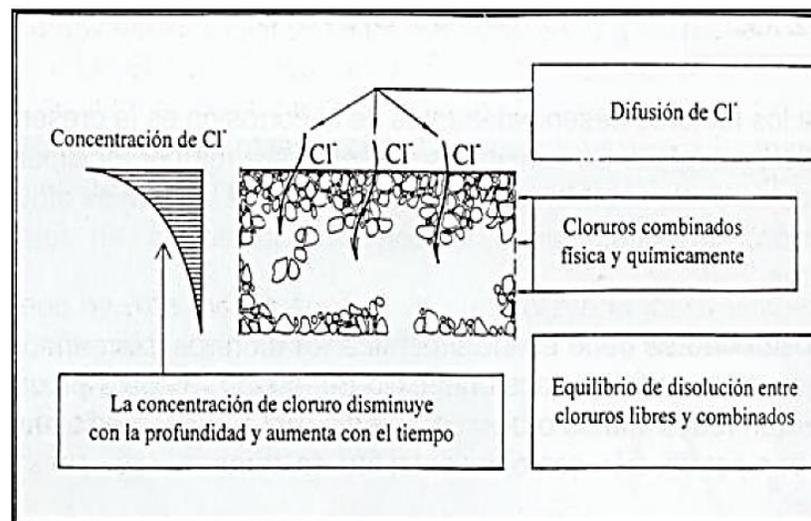


Fig. 1.4 Mecanismo de corrosión por penetración de cloruros (BIOUBAKHSH, 2011).

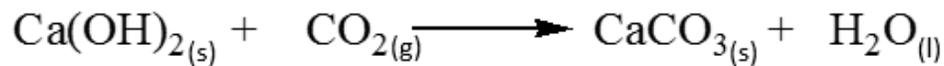
1.5.2 Corrosión del acero por Carbonatación

La carbonatación trata de la reacción que se produce entre el dióxido de carbono (CO_2) del aire y el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) resultante de la hidratación del cemento. Este proceso provoca una disminución del pH, desplazando a las armaduras de acero de la zona de pasivación a la zona de corrosión. Los hidróxidos de calcio ($Ca(OH)_2$), sodio ($NaOH$) y potasio (KOH) disueltos en la solución acuosa de la red de poros del hormigón (disolución de poros), provocan un pH de entre 12,5

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

y 13,5. El hormigón al ser poroso, permite la entrada y difusión del CO₂ reaccionando con la fase líquida intersticial saturada de hidróxido cálcico del hormigón y de los compuestos hidratados del cemento (disolución de poro) (Bello, 2013).

En términos simplificados, se produce la siguiente reacción:



Cuando la totalidad del Ca(OH)₂, NaOH y KOH presentes en los poros ha sido carbonatado, el pH comienza a decrecer. Al mismo tiempo los silicatos de calcio también reaccionan con el CO₂ del aire, prosiguiendo el descenso del pH del hormigón.

La velocidad de carbonatación del hormigón depende de múltiples factores como son la relación agua/cemento utilizada en su fabricación, la cantidad de cemento utilizado en la dosificación o de la humedad relativa del ambiente en el que se encuentra la estructura.

Hay que indicar que la carbonatación del hormigón no provoca, por sí misma, una corrosión apreciable de las armaduras. Para producir una velocidad de corrosión notable, es necesario que la humedad relativa ambiental sea superior a un mínimo crítico del 50%.

La naturaleza del cemento empleado influye en la cantidad de CO₂ combinado por la materia carbonatable del hormigón, pero no tiene influencia en el progreso posterior de la cinética de la corrosión (Bello, 2013).

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

El avance del proceso de carbonatación se puede aproximar a la raíz cuadrada del tiempo.

$$X_c = K_c \cdot \sqrt{t} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde:

X_c : Profundidad de la capa carbonatada (mm).

K_c : Constante de carbonatación (mm/año 0.5).

t : Tiempo (años).

Es importante señalar que el avance de la carbonatación se verá limitado por la humedad del ambiente, de manera que la ecuación anterior será válida para ambientes con humedad baja ya que en escenarios donde se tengan humedades altas y valores próximos a la saturación no se produce la corrosión, esta condición sugiere una profundidad límite para el frente carbonatado (Villanueva, 2012).

El desarrollo de la carbonatación depende de diversos factores, entre los que se encuentra:

- Contenido de CO₂ en la atmósfera.
- Permeabilidad de hormigón.
- Cantidad de sustancia carbonatable (contenido y tipo de cemento).
- Humedad relativa del ambiente.

Otras consideraciones que influyen en la carbonatación son que: un aumento en la relación agua/cemento favorece el proceso de carbonatación al aumentar la permeabilidad de los hormigones; por lo contrario, un aumento en la dosificación del cemento dificultaría el proceso. Por otro lado, humedades relativas entre el 50 y el 60 % favorecen al máximo la reacción de carbonatación, pero a partir de estos

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

valores se presenta un descenso que llega a valores nulos cuando se tienen hormigones completamente saturados. De igual manera ambientes con alta polución afectan a la calidad del recubrimiento, causa directa para que se origine la corrosión por carbonatación (Villanueva, 2012).

1.5.3 Factores que propician la corrosión

Influencia del pH:

El pH propio del hormigón, una vez puesto en obra, es aproximadamente de 13, por lo que, los estados posibles del acero son los de pasivación o el de inmunidad. El estado más habitual, atendiendo a los potenciales a los que se encuentra el acero, es el primero.

El hormigón confiere al acero una doble protección:

1.- El recubrimiento representa una barrera física que separa el metal del contacto directo de la atmósfera. El espesor del recubrimiento y su permeabilidad son los factores que controlan la eficacia de esta barrera.

2.- En la zona de contacto del hormigón con el acero, se forma una capa pasivante autogenerable, de muy pequeño espesor, en torno a 10 nm, debido a un proceso de naturaleza electroquímica, basado en la elevada alcalinidad del hormigón, usualmente en la región de pH entre 12,5 – 13,5 y por la existencia de un potencial eléctrico apropiado.

Mientras se mantenga el pH en esos valores, el acero se encontraría indefinidamente en estado pasivo. Los factores desencadenantes de la corrosión serían aquellos capaces de cambiar las condiciones del estado pasivo al activo, esto se produciría con la disminución del pH (del Valle Moreno et al., 2001).

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

Existen dos factores principales que provocan la disminución del pH:

- 1.- La carbonatación del hormigón.
- 2.- La presencia de iones despasivantes.

Por otro lado, habría que indicar la necesaria presencia de humedad y oxígeno como elementos indispensables para que la corrosión tenga lugar. En soluciones desaireadas, los potenciales de corrosión son muy negativos, lo que se traduce en que no se creen diferencias de potencial suficiente para provocar el ciclo autocatalítico (formación de iones H^+ y Cl^-).

Todos los factores desencadenantes de la corrosión son simultáneamente factores acelerantes de la misma, ya que aparte de hacerla posible, su distribución heterogénea crea un gran número de pilas de corrosión que contribuyen a aumentar el ataque (del Valle Moreno et al., 2001).

Influencia de la humedad:

La presencia del agua es necesaria para que la corrosión tenga lugar, pero es insuficiente por si sola para provocar el fenómeno. El proceso de corrosión implica de formación de partículas de carga eléctrica.

La corrosión, en la práctica, sólo se produce en el rango de humedades relativas entre el 50% y valores próximos a la saturación, siendo sensibles a la corrosión las zonas sometidas a ciclos de humectación y secado.

La humedad ambiental y la humedad del hormigón sólo coinciden en regímenes estacionarios. En sistemas donde existan variación de las condiciones, la humedad del hormigón es mayor al ser su velocidad de secado inferior. Este fenómeno se verá incrementado cuando exista presencia de cloruros debido a su efecto higroscópico.

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

No es posible que se inicie el proceso de corrosión sin la existencia de una cantidad mínima de agua. Este hecho implica que la velocidad de corrosión en un sistema saturado de agua sea más lenta, al tener que disolverse el oxígeno del agua para poder llegar a la superficie del metal, siendo la velocidad de solubilidad del oxígeno en el agua muy baja (del Valle Moreno et al., 2001).

Influencia de la temperatura:

Un aumento de la temperatura hace disminuir la resistividad del hormigón, propiciándose en mayor medida la corrosión, aunque este efecto puede verse contrarrestado por la evaporación de la disolución de poro existente en el hormigón. La disminución de la solubilidad del oxígeno con el incremento de la temperatura también puede equilibrar el incremento de la velocidad de la reacción

Todos los factores desencadenantes de la corrosión vistos en los temas anteriores, son simultáneamente factores acelerantes de la misma, ya que, aparte de hacerla posible, su distribución heterogénea en la superficie del electrodo crea un gran número de pilas de corrosión que contribuyen a aumentar el ataque. No obstante, para que desarrollen su capacidad potencial, como desencadenantes o acelerantes, depende de la oferta de oxígeno y, sobre todo, de humedad, el factor acelerante por excelencia del que depende la actividad de todos los restantes (del Valle Moreno et al., 2001).

1.5.4 Determinación de la profundidad de carbonatación

La carbonatación es una condición relativamente sencilla de identificar y diagnosticar. La manera más fácil de detectar la carbonatación en una estructura es romper un pedazo de hormigón (preferentemente cerca de un borde) en donde se sospeche que hay carbonatación.

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

El protocolo para medir la profundidad de la carbonatación se describe en la Norma Cubana NC 355:2004 (NC_355, 2004) y a continuación se detalla el proceder: Después de soplar todo el polvo residual del espécimen o del sustrato, se pulveriza una solución de 1 o 2 por ciento de fenolftaleína en alcohol sobre el concreto. Las áreas carbonatadas del hormigón no cambiarán de color, mientras que las áreas con un pH mayor de 9 a 9.5 adquirirán un color rosado brillante (ver figura 1.5). Este cambio muy apreciable de color muestra cuán profundamente ha progresado el "frente" de carbonatación dentro del hormigón.



Fig. 1.5 Ensayo de profundidad de frente carbonatado con aplicación de fenolftaleína.

1.6 Métodos para evaluar el grado de corrosión

Debido a la importancia del conocimiento del proceso de corrosión para evitar el degradado de las estructuras armadas de hormigón, con el transcurso de estas investigaciones se han desarrollado diversas técnicas analíticas de ensayo para poder emitir criterios acerca de la calidad y avance de este efecto que corroe al acero de refuerzo. A continuación, se muestra un resumen con algunas de las técnicas empleadas a nivel mundial (del Valle Moreno et al., 2001).

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

Tabla 1.2 Ensayos más comunes para determinar la corrosión (Gordon Ping Gu and Ramachandran).

Ensayo	Capacidad de Detención	Aplicación	Ventajas	Limitaciones
Medición de resistividad	Cualitativa	Problemas por presencia de iones cloruros (Cl ⁻).	Permite preseleccionar áreas con potencialidad corrosiva. Medida rápida.	Interpretación compleja de los resultados. Disponibilidad de equipo de medida. Hormigón carbonatado.
Medición de potenciales	Cualitativa	Cualquier estructura	Permite preseleccionar áreas con potencialidad corrosiva. Medida rápida.	Interpretación compleja de los resultados.
Medición de velocidad de corrosión	Cualitativa	Cualquier estructura	Permite una vez conocido el tipo de corrosión, evaluar la pérdida de sección de la armadura.	Disponibilidad del equipo adecuado que permite medir la caída óhmica.
Medición de resistencia a la compresión y volumen de vacíos	Cuantitativa	Cualquier estructura	En conjunto con volumen de vacíos o relación agua/cemento, o contenido de cemento, evalúa la calidad del hormigón.	Ensayo destructivo.
Determinación de profundidad de carbonatación	Cuantitativa	Cualquier estructura	Permite identificar fácilmente este fenómeno y el tiempo para alcanzar la armadura.	Ensayo destructivo.

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

Perfil de cloruros	Cuantitativa	Cualquier estructura	Permite determinar la calidad del hormigón y el tiempo para que se presente la corrosión del acero.	Ensayo destructivo. Interpretación compleja. Apoyo estadístico.
--------------------	--------------	----------------------	---	---

1.6.1 Técnicas electroquímicas para estimar el estado de corrosión del refuerzo

Por las características del hormigón de ser una masa de apariencia homogénea y compacta, se podría pensar que es impermeable al paso de líquidos y gases e inerte químicamente. Pero los daños observados en obras civiles demuestran lo contrario, registrándose agrietamientos y elementos metálicos fuertemente oxidados en el interior del hormigón.

La estimación del estado de corrosión de la armadura metálica ha sido estudiada colocando muestras en diferentes condiciones de temperatura, concentración salina, interperismo, etc., conocidas mediante el análisis del estado superficial de las varillas. Estos ensayos requieren periodos prolongados y es indispensable remover la cubierta de hormigón de la varilla, siendo una prueba destructiva.

El uso de técnicas electroquímicas se ha presentado como una opción para el estudio del acero de refuerzo embebido en hormigón mediante señales eléctricas y el análisis de la respuesta del sistema. La rapidez de la medición y sensibilidad son algunas ventajas de las técnicas electroquímicas, además de ser pruebas no destructivas. Las más utilizadas son: medición de potencial (E_{corr}), resistencia de polarización (R_p), voltametría cíclica y espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS). Cada una de ellas aporta información acerca de las condiciones de la interface acero-hormigón y con ello del grado de corrosión que se presenta en la armadura (Broomfield, 1997).

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

Las técnicas electroquímicas, consisten en la aplicación de señales de potencial y el registro de su respuesta en corriente, o bien la aplicación de señales de corriente y el registro de la respuesta en potencial. De las dos maneras, se polariza la interface, y su respuesta es característica de cada sistema bajo estudio.

La resistencia a la polarización (R_p) cíclica es la técnica electroquímica más simple y de mayor facilidad de manejo. Aunque la medida de un potencial electroquímico no aporta información cuantitativa sobre la velocidad de corrosión, ofrece indicaciones cuantitativas 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-876-9145, la cual establece criterios que relacionan al potencial de corrosión y su condición de corrosión, mostrados en la siguiente tabla (Broomfield, 1997).

Tabla 1.3 Potencial y probabilidad de corrosión

Ecor vs ECS (mV)	Probabilidad de corrosión
> -120	10 % que se presente
-120 a -270 mV	zona incierta
<-270 mV	90% que se presente

La técnica de R_p se realiza conectando una terminal de un voltímetro, 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 1.6 (Broomfield, 1997).

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

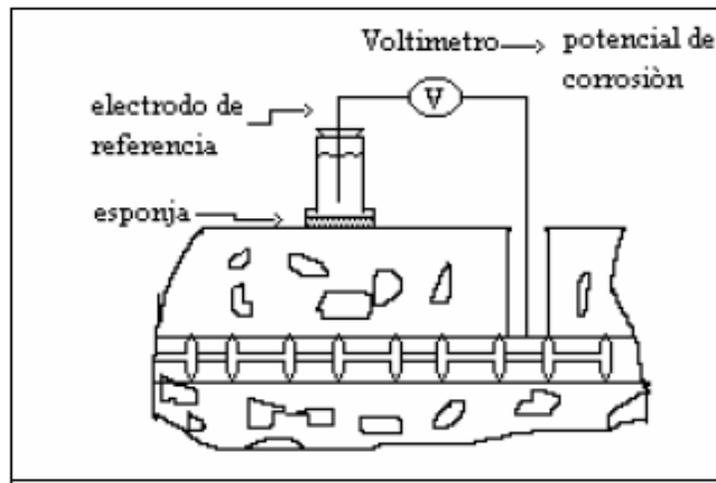


Fig.1.6 Técnica de resistencia de polarización.

1.6.2 Modelo de corrosión de macroceldas

La corrosión de acero en estructuras de hormigón sucede por un proceso de oxidación seguido por el desgaste de la película pasiva del acero, producto de la entrada de iones cloruro u óxido de carbono. Las grietas de corrosión no pueden identificarse directamente en la superficie de una estructura en la fase inicial, sino que sólo aparecen en la superficie de la estructura después de que un producto corrosivo alcance el límite de cantidad. Además, después de la aparición de la corrosión en la superficie, la corrosión significativa sucede a través de las grietas debido al flujo mayor de entrada de iones cloruro más óxido de carbono. Además, la seguridad de la estructura se verá amenazada por la propagación acelerada del proceso de corrosión. Por lo general, es aceptado dividir el proceso de corrosión en 4 etapas a saber: incubación, propagación, aceleración y deterioro (C.M. Hansson 2006).

Es necesario estructurar un protocolo para determinar en tiempo real y bajo condiciones ambientales controladas, la corrosión del acero de refuerzo, en especímenes de hormigón completamente carbonatados elaborados con cementos

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

P-35 y LC³. Para ello se propone un sistema de simulación de carbonatación total de los diferentes especímenes, donde a partir de un flujo energético (provocado por el movimiento interno de los electrones desde el ánodo hasta el cátodo) entre las varillas de acero inoxidable y de acero negro, embebidas en el hormigón, tendremos constancia del tiempo que se demora en corroerse el acero, y qué influencia tienen los distintos materiales componentes del hormigón, así como las distintas distancias de recubrimiento. De acuerdo con la especial distribución de las áreas anódicas y catódicas en la superficie del acero de refuerzo, pueden encontrarse dos tipos de corrosión en el hormigón reforzado, denominándose corrosión de microcelda o corrosión de macrocelda. La corrosión a nivel de microcelda resulta de un ambiente electroquímico del acero uniforme. En el caso de las áreas del ánodo y el cátodo, la corrosión ocurre en inmediatamente en áreas adyacentes a la superficie de acero y por consiguiente cada electrón producido por la reacción anódica es localmente consumido por la reacción catódica. La caída óhmica entre las microceldas anódicas y catódicas debido a la resistividad es despreciable (C.M. Hansson 2006).

En el caso de un ambiente no uniforme, como es el caso del hormigón parcialmente carbonatado, el estado electroquímico de la barra de acero puede variar de un punto a otro, ocurriendo la despasivación de algunas áreas, mientras que otras permanecen dentro del rango de pasivación. Debido a que, en el hormigón armado, las barras de acero están eléctricamente conectadas, algunas áreas activas y pasivas pueden intercambiar electrones producidos por la reacción anódica local. Este fenómeno corresponde a una corrosión a nivel de macroceldas. Físicamente, los sistemas a base de macroceldas, pueden ser definidos como el acoplamiento electroquímico de sistemas de microceldas activas y pasivas, siendo posible para los dos sistemas el intercambio de electrones a través de la red metálica (Sohail et al., 2013). Otra definición de este tipo de sistema es dado por Elsener y demás autores al considerar que el circuito macrocelda es un circuito de corrosión que se produce entre el ánodo y el cátodo a cierta distancia uno del otro. La velocidad de corrosión del acero en el hormigón aumenta principalmente debido a la formación

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

de circuitos de macrocelda, a diferencia del proceso de corrosión del acero, que causa la subestimación de la tasa de corrosión justo por la intersección de las curvas de polarización anódica y catódica (Elsener et al., 2003). Como resultado, es esencial tratar el proceso de corrosión del acero en el hormigón como un circuito de macroceldas tanto teórica como prácticamente.

El término modelo de corrosión de macroceldas significa, el modelo para calcular el potencial de media celda y la densidad de corriente dentro del circuito recién formado entre dos elementos a lo largo de las barras de refuerzo, calculando la caída óhmica

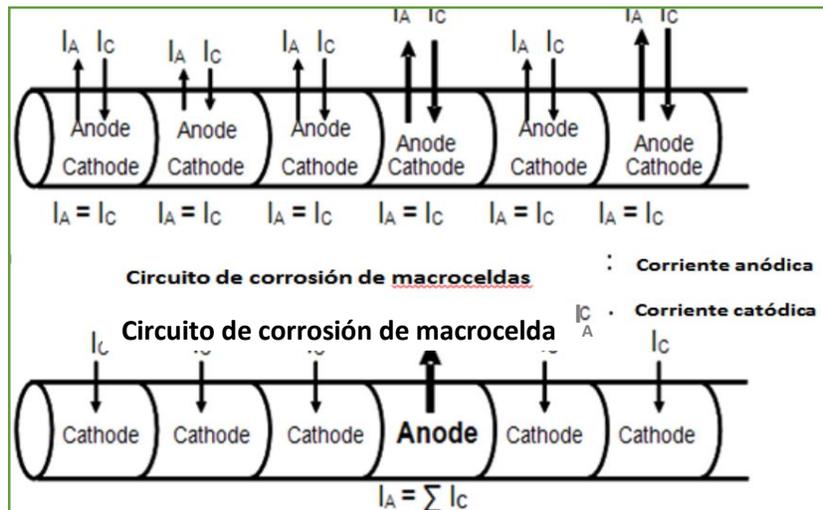


Fig.1.7 Modelo de circuitos de corrosión de microceldas y macroceldas (Elsener et al., 2003).

Se supone que no hay interacción entre electrodos separados. Sin embargo, una vez que se inicia la corrosión, debe haber una interacción entre electrodos separados debido a la existencia de polarización. Como resultado, se establece un modelo para la corrosión de células macro, asumiendo la formación de una macrocelda como la interacción entre electrodos separados. Una vez que se tiene

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

en cuenta la interacción entre electrodos separados, la polarización de activación es indispensable para generar la energía de activación esencial requerida para las reacciones de corrosión. Así, como muestra la Fig.1.7, la corrosión de macrocelda está relacionada con la formación de un circuito de macroceldas debido a la separación entre el ánodo y el cátodo a lo largo de la barra de refuerzo. El denominado modelo de corrosión de macroceldas significa otro efecto de polarización debido a la diferencia en el potencial de microceldas (Tsuyoshi and Hitoshi, 2007).

Las investigaciones realizadas hasta el momento, referentes a la evaluación del proceso de corrosión basado en los fundamentos de los sistemas de macrocelda, reportan estudios de corrosión por ataque de cloruros y por carbonatación del hormigón reforzado. Sin embargo, estos últimos han sido poco difundidos entre la comunidad científica debido a los largos tiempos que conlleva el ensayo, y por consiguiente, han desarrollado metodologías que aceleran el proceso de corrosión para poder explicar este comportamiento dentro del hormigón, siendo pocos los estudios que evalúan el grado de corrosión del acero de refuerzo en tiempo real (Tsuyoshi Maruya 2007).

1.7 Conclusiones parciales del capítulo:

1. El hormigón reforzado con varillas de acero, es uno de los materiales de construcción más empleados en la actualidad, pero tienen el inconveniente de ser susceptibles al deterioro de las barras de acero por la corrosión, afectando con ello el período de vida útil para el cual está destinada la estructura.
2. La corrosión del acero en estructuras de hormigón sucede por un proceso electroquímico de oxidación seguido por el desgaste de la película pasiva del acero, producto de la entrada de iones cloruros o por el proceso de carbonatación.

Capítulo I: Corrosión del acero de refuerzo, y su monitoreo en el hormigón armado

3. La carbonatación se basa en la reacción que se produce entre el CO_2 presente en el aire y el Ca(OH)_2 resultante de la hidratación de la pasta de cemento. Este proceso provoca una disminución del pH, desplazando así a las armaduras de acero de la zona de pasivación a la zona de corrosión.
4. Los estudios existentes para determinar el grado de corrosión del acero de refuerzo son en su mayoría, métodos destructivos y requieren de una interpretación compleja de los resultados. Es por ello que la metodología basada en los sistemas de macrocelda resultan métodos viables para determinar el efecto corrosivo permitiendo evaluar este fenómeno en tiempo real y condiciones ambientales controladas.

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocela para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocela para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC³

En este capítulo se expone el protocolo experimental empleado en la obtención de los resultados para evaluar en tiempo real la corrosión del acero de refuerzo en hormigones completamente carbonatados, fabricados con cementos LC³-50 y P-35. Para lograr este objetivo se describen las características de los materiales constituyentes, la metodología desarrollada en el ensayo de la macrocela, así como todos los equipos e instrumentos empleados en el mismo.

Para ello se fabricaron especímenes de hormigón con cemento P-35 y LC³- 50 reforzados con varillas de acero. Estas elaboraciones fueron llevadas a cabo en el laboratorio de materiales de construcción de la Facultad de Construcciones en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, donde también se montó todo el protocolo de la macrocela.

2.1 Caracterización de los materiales constituyentes del hormigón

2.1.1 Cementos

Para el desarrollo experimental de dicho proyecto se emplearon dos tipos de cementos: Cemento Portland 35 (P-35.), proveniente de la fábrica de cemento Carlos Marx, de Cienfuegos y el cemento de bajo carbono LC³- 50 formado a partir de la fusión a partes iguales del LC² producido con la arcilla del yacimiento de Yaguajay y con cemento P-35. Los datos del análisis químico de la arcilla de Yaguajay se muestran a continuación.

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

Tabla 2.1 Análisis químico del cemento LC²

Arcilla	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₃	Otros	PPI
Yaguajay	46,58	20,06	14,41	2,94	0,74	0,04	0,11	0,06	1,12	0,13	0,73	0,14	12,74

El aglomerante empleado se caracterizó según los ensayos estandarizados en la NC 96:2011 “Cemento con adición activa. Especificaciones” (NC_96, 2011) para evaluar su conformidad.

En la Tabla 2.2 se muestran los requisitos que tiene que cumplir el cemento P-35, así como los métodos de ensayo a emplear.

Tabla 2.2 Requisitos y métodos de ensayo para Cemento Portland P-35

Parámetro	Requisitos	UM	P-35	Método de ensayo
Físicos	Superficie Específica Blaine (mín.)	cm ² /g	2800	NC 980:2013
	Tiempo fraguado inicial (mín.)	min	45	NC 524
	Tiempo fraguado final (mín.)	h	10	
	Estabilidad de volumen por Le Chatelier (máx.)	mm	10	NC 504
Mecánicos	Resistencia a la compresión (mín.) 3 días	MPa	17	NC 506
	Resistencia a la compresión (mín.) 7 días		25	
	Resistencia a la compresión (mín.) 28 días		35	
Químicos	Pérdida por ignición (máx.)	%	4,0	NC 507
	Residuo insoluble (máx.)	%	4,0	
	Óxido de Magnesio (máx.)	%	5,0	
	Trióxido de Azufre (máx.)	%	3,5	

Fuente: (NC_95, 2011)

El producto se aceptará si los resultados de ensayo cumplen con los requisitos establecidos en la Tabla 2.2 de la NC 95-2011.

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

Tabla 2.3 Cemento P- 35. Resultado de ensayos, fábrica de Cementos Carlos Marx, Cienfuegos

ENAYOS MECÁNICOS							OBSERVACIONES
Ensayo	Resultados			Según NC 96:2011			
Resistencia a compresión (MPa)	3	7	28	3	7	28	El producto cumple con las especificaciones de la noma con respecto a ensayos mecánicos.
	Días	días	días	días	días	días	
Resistencia a compresión (MPa)	23,5	31,6	46,2	17	25	35	
ENSAYOS FÍSICOS							OBSERVACIONES
Ensayo	Resultados			Según NC 96:2011			
Superficie Específica (cm ² /g)	3671			2800			El producto cumple con las especificaciones de la noma con respecto a ensayos físicos.
Tiempo de Fraguado Inicial (min)	3,67			45			
Tiempo de Fraguado Final (h)	5,79			10			
ENSAYOS QUÍMICOS							OBSERVACIONES
Ensayo	Resultados			Según NC 96:2011			
Pérdida por ignición (máx.) %	3,67			4,0			El producto cumple con las especificaciones de la

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macroelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

Residuo insoluble (máx.) %	5,79	4,0	noma con respecto a ensayos químicos.
Trióxido de Azufre (máx.) %	0,72	3,5	

Fuente: Ficha técnica del cemento P-35

2.1.2 Áridos

Los áridos utilizados proceden de la cantera Mariano Pérez (El Purio). Todos los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Materiales de la Construcción, de la Facultad de Construcciones, de la Universidad Central de Las Villas. A continuación, se muestran las tablas de los resultados de ensayos a los áridos.

Tabla 2.4 Características fracción 4.76-0.147mm

Especificaciones Según NC 251-2013		Ensayos realizados			Según NC251:2013
9,5	100	Peso Específico (g/cm³)	Corriente	2,40	2,50
4,75	90-100		Saturado	2,48	
2,36	70-100		Aparente	2,61	
1,18	45-80	Peso Volumétrico (Kg/m³)	Suelto	1430,104	
600 μ	25-60		Compactado	1614,854	
300 μ	10-30	Absorción (%)	3,33		≤ 3,0
150 μ	2-10	Tamiz 200 (%)	4,3		≤ 3,0
Módulo de finura			3,42		2,20 – 3,58

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

Tabla 2.5 Análisis Granulométrico

	Tamiz N°										
	25.0	19.0	12.5	9.50	4.75	2.36	1.18	600	300	150	74
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	µm	µm	µm	µm
%				100	99	67	48	28	13	4	
Pasado NC 251:2013				100	90-100	70-100	45-80	25-60	10-30	2-10	

Observaciones: El material no cumple con la NC 251:2013 (NC_251, 2013).

Áridos para hormigones Hidráulicos – Requisitos.

Tabla 2.6 Características fracción 9.50-4.76mm

Especificaciones		Ensayos realizados			Según NC251:2013
Según NC 251-2013					
12,5	100	Peso Específico (g/cm³)	Corriente	2,39	2,50
9,5	85-100		Saturado	2,46	
4,75	15-35		Aparente	2,6	
2,36	0-10	Peso Volumétrico (Kg/m³)	Suelto	1401,910	
1,18	0-5		Compactado	1577,21	
		Absorción (%)	3,03		≤ 3,0
		Tamiz 200 (%)	5,3		≤ 1,0
Módulo de finura			3,42		

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

Tabla 2.7 Análisis Granulométrico

	Tamiz N°										
	25,0	19,0	12,5	9,50	4,75	2,36	1,18	600	300	150	74
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	µm	µm	µm	µm
%			100	98	46	18	11				
Pasado NC 251:2013			100	85-100	15-35	0-10	0-5				

Observaciones: El material no cumple con la NC 251:2013 (NC_251, 2013)
Áridos para Hormigones Hidráulicos – Requisitos.

Tabla 2.8 Características fracción 19.0-9.50mm

Especificaciones Según NC 251-2013		Ensayos realizados			Según NC251:2013
25	100	Peso Específico (g/cm³)	Corriente	2,44	2,50
19,0	90-100		Saturado	2,51	
12,5	20-55		Aparente	2,6	
9,5	0-15	Peso Volumétrico (Kg/m³)	Suelto	1452,801	
4,75	0-5		Compactado	1579,927	
		Absorción (%)	3,03		≤ 3,0
		Tamiz 200 (%)	2,4		≤ 1,0

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macroceda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

Tabla 2.9 Análisis Granulométrico

	Tamiz N°										
	25.0	19.0	12.5	9.50	4.75	2.36	1.18	600	300	150	74
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	µm	µm	µm	µm
%	100	95	53	30	11						
Pasado											
NC											
251:2013	100	90-100	20-55	0-15	0-5						

Observaciones: El material no cumple con la NC 251:2013 (NC_251, 2013)
Áridos para Hormigones Hidráulicos – Requisitos.

De manera general, los áridos empleados no cumplen con las especificaciones de la norma propuesta debido a que este constituye un problema de índole nacional, dado que la industria del árido no consta con la tecnología adecuada para ofrecer un producto con un mejor acabado.

2.1.3 Aditivo

Se empleó un aditivo superplastificante, Dynamon SX32, este aditivo es producido a base de polímeros acrílicos no sulfonados, completamente exento de formaldehído. Posee como propiedades el aumento en la trabajabilidad del hormigón, logra reducir la relación agua- cemento en el hormigón, proporcionándole una adecuada permeabilidad y una alta resistencia mecánica. Es suministrado por MAPEI (Materiales Auxiliares para la Construcción y la Industria) una empresa italiana y los datos técnicos ofrecidos por el fabricante se muestran en la Tabla 2.6 “Características del aditivo Dynamon SX32”. La dosificación para el empleo del aditivo en volumen puede variar entre 0.5 y 1.5 litros por cada 100 kg de cemento (MAPEI, 2000).

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3



Fig. 2.1 Aditivo Superplastificante Dynamon SX32 (MAPEI, 2000)

Tabla 2.10 Características del aditivo Dynamon SX-32

Composición química	Dynamon SX-32
Densidad (g/cm ³)	1,08 ± 0,02 a 20° C
pH	6,5 ± 1
Residuo seco (%)	22,1 ± 1,1
Contenido de Cloruro (%)	<0,1
Contenido de Álcali (Na ₂ O) equivalente (%)	<3,5
Clasificación	Superfluidificante

2.1.4 Agua de amasado

Se empleó agua potable según la NC 353:2004 (NC_353, 2004) “Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones”. Esta especifica que se considera apta para el amasado y curado de los hormigones y morteros el agua fresca potable, proveniente de acueductos y de otras fuentes de

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

abastecimiento, cuya utilización esté adecuadamente avalada por resultados prácticos, con materiales análogos y uso semejante.

2.2 Aceros

Se emplearon dos tipos de acero, el acero negro, barra corrugada de 12mm de diámetro y acero inoxidable de 14mm de diámetro.

Acero negro

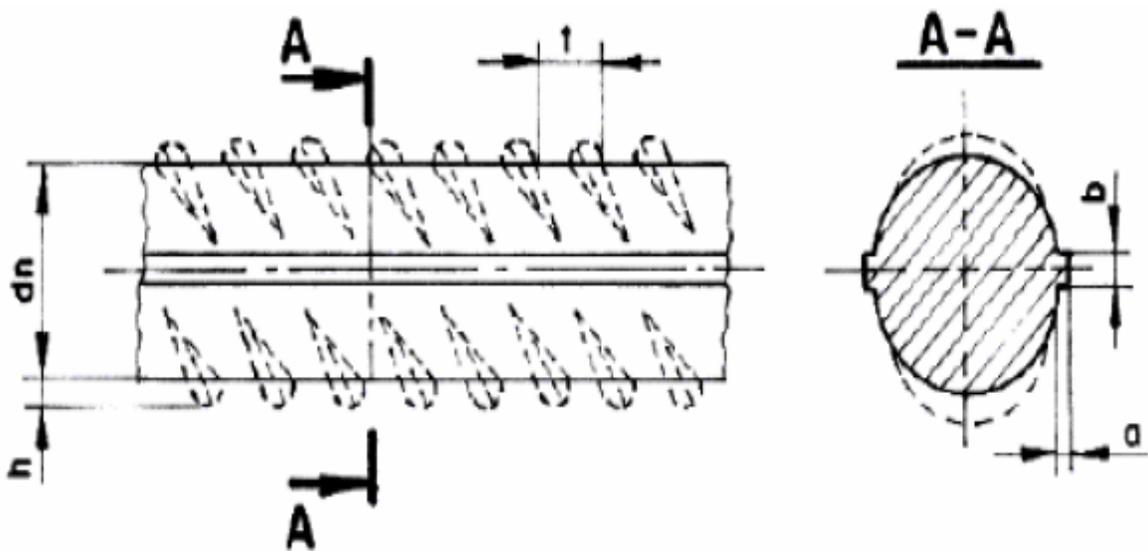


Fig. 2.2 Barra corrugada (corruga helicoidal parcial)

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macroelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

Tabla 2.11 Parámetros y dimensiones principales del acero negro (NC_752, 2010)

No.	Peso lineal (masa) Kg/m	Dimensiones Nominales			Requisitos Nominales de la Corruga y Nervio (mm)							
		(dn)		(An)	(t)	(h)	(a)		(b)		Máx. sep.	
		mm	(pulg)	mm ²	Min	Max		Min	Max	Min	Max	
13 (4)	0,994	12,7	1/2	129	6,3	8,9	0,7	0,63	1,77	1,01	2,03	4,9
Observaciones: <ul style="list-style-type: none"> • (No.) Designación de la barra • (dn) Diámetro • (An) Área de la sección circular • (t) Espaciamiento promedio • (h) Altura Mínima promedio • (a) Altura del nervio • (b) Grueso del nervio • (Máx sep) Máxima separación (cuerda de 12.5% del perímetro nominal) 												

2.2.1 Preparación de las barras de acero

Acero negro

Para poder emplear el acero como refuerzo del hormigón es necesario que la superficie no presente defectos tales, como escamas, rajaduras, burbujas, desgarraduras u otros que afecten sus requisitos.

El acero fue producido en barras comerciales de 9 metros las cuales fueron cortadas en partes de 150 mm siendo rebajadas a 147mm para facilitar la colocación en los moldes cúbicos de 150x150x150mm. Para mejorar las condiciones del acero,

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

realizó un trabajo de preparación dado que estaban oxidado el cual consistió en NC 752:2010 (NC_752, 2010):

1. Colocación del acero en la desecadora con el oxide para prevenir la corrosión manteniéndose por 2 días sin destapar.
2. Pasados los dos días se eliminó toda la capa de óxido con un cepillo de alambre para pulir y dejar limpia toda la superficie.
3. Se enjuagó en agua por un corto período de tiempo para eliminar la capa de resina epóxica.
4. Colocación del acero en alcohol isopropílico con un 99.9% de pureza para eliminar el agua restante del paso anterior.
5. Colocación de las barras de acero en una desecadora para mantenerlo bajo condiciones de ambientales estables, evitando con ello que se desencadene un proceso corrosivo.



Fig. 2.3 Preparación, limpieza y conservación del acero

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocela para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

Acero inoxidable

En metalurgia, el acero inoxidable se define como una aleación de acero con un mínimo del 10 % al 12 % de cromo contenido en masa. El acero inoxidable es un acero de elevada resistencia a la corrosión, dado que el cromo, u otros metales aleantes que contiene, poseen gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora, evitando así la corrosión del hierro (los metales puramente inoxidables, que no reaccionan con oxígeno son oro y platino, y de menor pureza se llaman resistentes a la corrosión, como los que contienen fósforo). Sin embargo, esta capa puede ser afectada por algunos ácidos, dando lugar a que el hierro sea atacado y oxidado por mecanismos intergranulares o picaduras generalizadas. Algunos tipos de acero inoxidable contienen además otros elementos aleantes; los principales son el níquel y el molibdeno. Las barras de acero inoxidable empleadas en este estudio presentan un diámetro de 14 mm y longitud 150mm (FAMIQ, 2016).



Fig. 2.4 Acero inoxidable

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

2.3 Diseño experimental de mezclas de hormigón para especímenes

La investigación se desarrolló en el laboratorio de materiales de la Facultad de Construcciones de la UCLV, dado la experiencia del personal técnico y profesional del centro en materia de ensayos al hormigón y la disponibilidad de los instrumentos y métodos de trabajo.

2.3.1 Variables Independientes

- **Tipo de cemento**

Para el desarrollo experimental de dicho proyecto se emplearon dos tipos de cementos: Cemento Portland 35 (P-35.), proveniente de la fábrica de cemento Carlos Marx, de Cienfuegos y el cemento de bajo carbono LC³- 50 formado a partir de la fusión a partes iguales del LC² producido con la arcilla del yacimiento de Yaguajay y con cemento P-35

- **Cantidad de aditivo**

El empleo del tipo y contenido de aditivo Dynamon SX32 estuvo en dependencia del asentamiento que se desea lograr en cada mezcla, empleando para ello el ensayo del cono de Abrams, y además del tipo de cemento a emplear, siendo una mayor proporción de este en el cemento LC³-50, con respecto al cemento P-35, utilizando.

2.3.2 Variables dependientes

- **Asentamiento**

Se midió el asentamiento como efecto del aditivo en la fluidez de las mezclas mediante el cono de Abrams según la NC 174: 2002 (Hormigón fresco. Medición

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macroelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

del asentamiento por el cono) y se establece un intervalo del asentamiento entre 12 y 15 cm.

- **Resistencia a compresión**

La resistencia del hormigón determinada mediante las especificaciones de la Norma NC 244:2005 (Hormigón hidráulico resistencia a compresión), es un resultado que depende de todo el proceso, materiales, método empleado y variables, y fue analizada a los 7 y 28 días.

- **Corrosión el acero de refuerzo**

Para estimar una probabilidad de corrosión del acero, empleamos el método de la resistividad eléctrica, pero no nos da un valor de que si está ocurriendo o no este fenómeno. Para determinar la posible ocurrencia de la corrosión del acero en tiempo real y bajo condiciones ambientales controladas se manejó el método de la Macroelda.

2.3.3 Procedimientos.

Selección de los constituyentes del hormigón.

Se seleccionan los materiales constituyentes del hormigón, que en este caso fueros tres fracciones de áridos, cemento, agua y aditivo químico.

Elaboración de las mezclas de hormigón.

Primeramente, se pesan los constituyentes realizando las correcciones por humedad correspondientes a cada material, luego se realiza el mezclado de los mismos en una hormigonera de paleta con un tiempo de mezclado de 3 minutos.

Chequeo de asentamiento.

Se realizó a través del ensayo del cono de Abrams según lo establece la NC 174:2002.

Toma de muestras.

Se realizó llenando moldes cilíndricos de 10x20cm y 15x30cm a razón de dos capas iguales compactadas con vibrados de inmersión según lo estimado en la NC 221:2002.

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

Curado de los especímenes.

El curado se realiza una vez desmoldados las probetas pasadas 24 ± 8 horas se sumergen en agua según lo estipula la NC 221:2002.

2.4 Fabricación del hormigón

2.4.1 Dosificación de las mezclas de hormigón empleadas

Las dosificaciones elegidas para los hormigones de esta investigación responden a una resistencia de diseño de 35 MPa, empleando para ello aditivo SX-32, para lograr un asentamiento de 12 ± 3 cm por el Cono de Abrams clasificado según la (NC_120, 2014) "Hormigón hidráulico. Especificaciones" como consistencia fluida.

Tabla 2.12 Dosificación gravimétrica kg/m^3 de hormigón con P-35 y LC³

Muestra	NC	f'c	Relación	Cem	Aditiv	0-5mm	5-10mm	10-20mm	Agua
	120:2014			a/c	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg
P-35 (H1)	Muy Alta	35	0,4	430	3.87	634	352	775	172
LC ³ (H1)	Muy Alta	35	0,4	430	8.6	634	352	775	172

2.4.2 Producción de hormigón

La fabricación de los hormigones se llevó a cabo en los laboratorios de materiales del CIDEM en la facultad de Construcciones de la Universidad Central "Marta Abreu" y para ello se utilizó una mezcladora de paleta de 1000 litros. Todas las mezclas fueron realizadas siguiendo el mismo orden. Primero se vertió en la mezcladora el árido grueso, el árido intermedio, el árido fino y el agua necesaria para la pre saturación de los mismos, se homogenizó, seguido de este tiempo de se agrega el cemento y se homogeniza, se le añade la cantidad de agua de amasado con una

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

porción del aditivo en el menor tiempo posible desde la puesta en marcha de la hormigonera. Se prosigue con una prueba del asentamiento mediante el cono de Abrams según la NC 174:2002 “Hormigón fresco. Determinación del asentamiento por el cono” (NC_174, 2002). En el caso de que no cumpliera seguíamos probando con más aditivo, pero en ambos casos, es decir, para el LC³ y para el P-35 cumplió desde el primer instante.

Tabla 2.13 Producción de hormigón

Tipo de Cemento	Resistencia a la compresión			Permeabilidad al aire	Prof. Carb.	Resistividad	Corrosión
	15x30 cm			15x15x15 cm	10x20 cm	10x20 cm	15x15x15 cm
	3d	7d	28d				
LC³	3	3	3	3	3	3	4
P-35	3	3	3	3	3	3	4
Total	6	6	6	6	6	6	8
Volumen (l)	32	32	32	25	15	15	30
Volumen Total	185 litros						

2.4.3 Moldes empleados

Para la evaluación de los especímenes se emplearon moldes cilíndricos de 10 x 20 cm y de 15 x30 cm, y moldes cúbicos de 15x15x15 cm respectivamente.

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

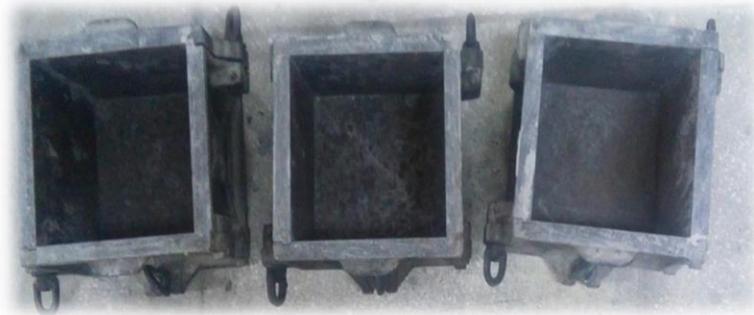


Fig. 2.5 Moldes Cúbicos de 150x150x150mm.



Fig. 2.6 Moldes cilíndricos 150x300mm y 100x200 mm.

2.4.4 Llenado de probetas, compactación y conservación

Se ha tomado como referencia la NC 221:2002 "Hormigón. Elaboración de probetas para ensayos" (NC_221, 2002). Una vez amasado, debemos introducir el hormigón en los moldes. Previamente al llenado de las probetas, las paredes y bases de los moldes se impregnan de un aceite que facilita su posterior desmolde.

Una vez realizado el hormigón se introduce en los moldes en 3 capas las cuales fueron compactadas hasta que aflore la pasta de mortero, luego se enrasa la superficie de las probetas para evitar rugosidades en la superficie de las mismas.

Las probetas se conservan durante 24 horas en los moldes. Transcurrido ese tiempo se extraen de los moldes y se marcan de forma que no se alteren las superficies que han de estar en contacto con los platos de la prensa de ensayo.

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

Posteriormente las probetas se transportan a la piscina de curado, donde se almacenan hasta la realización de los ensayos.



Fig. 2.8 Llenado de los moldes y curado.

2.5 Ensayos al hormigón en estado fresco

2.5.1 Consistencia

La Consistencia del Hormigón Fresco es el mayor o menor grado que tiene el hormigón fresco para deformarse y como consecuencia de esta propiedad, de ocupar todos los espacios del encofrado o molde donde se vierte, además es un índice indirecto de evaluar la docilidad.

En la consistencia influyen diferentes factores, en especial la cantidad de agua de amasado, pero también el tamaño máximo del árido, la forma de los áridos y su granulometría, trayendo consigo que la mezcla sea más laborable y fluida, lo que permite hacer una correcta colocación del hormigón. La consistencia del hormigón debe fijarse previamente a la puesta en obra, analizando que consistencia es la más adecuada para colocación de acuerdo a los medios de compactación con que se dispone. Este es un parámetro fundamental en el hormigón fresco.

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

Existen distintos métodos para medir la consistencia como el Cono de Abrams, consistómetro VeBe, la mesa de fluidez y los docilímetros. El ensayo más conocido para medir esta propiedad es el Cono de Abrams, por ser de fácil aplicación y muy práctico a la hora de ser utilizado a pie de obra (Rodríguez, 2012).

Cono de Abrams (NC_174, 2002):

Es un ensayo de asentamiento que depende de las características y proporciones de los componentes del hormigón. Consiste en colocar el hormigón dentro de un molde troncocónico con una altura de 30 cm, un diámetro superior de 10 cm y un diámetro inferior de 20 cm. Para poner en práctica el procedimiento se siguen los pasos siguientes:

- 1- Se humedece el molde y se coloca sobre una superficie ligeramente humedecida también.
- 2- Se llena el molde en tres capas iguales, compactándose con 25 golpes de varilla compactadora al final de cada capa.
- 3- Al terminar de compactarse la última capa se enraza con una espátula.
- 4- Se retira el cono verticalmente.
- 5- Se mide el asentamiento de la mezcla con respecto al borde superior del cono.

Tabla 2.15 Consistencia del hormigón en función del asentamiento por el cono de Abrams (NC_174, 2002).

Tipo	Valoración cualitativa	Asentamiento en mm
A1	Seca	10 a 40
A2	Plástica	50 a 90
A3	Blanda	100 a 150

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

A4	Fluida	160 a 210
A5	Muy fluida	≥ 220

2.6 Ensayos al hormigón en estado endurecido

2.6.1 Resistencia mecánica a compresión a edades de 7 y 28 días

El hormigón endurecido presenta resistencia a las acciones de compresión, tracción y desgaste. La principal es la resistencia a compresión que lo convierte en el importante material que es. Se mide en Mpa y llegan hasta 50 Mpa en hormigones normales y 100 Mpa en hormigones de alta resistencia.

Las especificaciones para el hormigón exigen una resistencia determinada a la compresión a 28 días, aunque no necesariamente es la condición dominante. Las especificaciones pueden imponer limitaciones a la relación a/c máxima admisible y al contenido unitario mínimo de cemento. Es importante que exista un compromiso entre las limitaciones para lograr un óptimo en las propiedades efectivas que tendrá el hormigón. El empleo de adiciones minerales para la producción de cementos mezclados no solo trae beneficios ecológicos, sino que contribuye a la mejora de determinadas propiedades en los hormigones, tales como menor calor de hidratación, resistencias mecánicas superiores, alta resistencia ante sulfatos, baja permeabilidad, así como baja reactividad álcali-agregado. El comportamiento mecánico de los hormigones fabricados se evaluó mediante los ensayos a compresión realizados en el laboratorio de materiales de la Facultad de Construcciones de la UCLV. Para ello se tomaron 3 probetas de 15x30 cm por cada serie y por cada mezcla para ser ensayadas a los 7 y 28 días resultando un total de 6 especímenes para el hormigón producido con el LC³ – 50 y 6 para el hormigón producido con el P-35. Para poner en práctica el ensayo se colocaron las probetas

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocela para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

cilíndricas centradamente en el plato de la máquina y se le aplicó una fuerza con carga continua a razón de 1mm x minuto hasta su rotura. (NC_506, 2013)



Fig. 2.10 Resistencia a compresión de hormigones con LC³-50 (izquierda) y P-35 (derecha).

2.6.2 Resistividad a edades 7 y 28 días (Family, 2015)

El Resipod se ha concebido para medir la resistividad eléctrica de hormigón. Se aplica una corriente a dos sondas exteriores y se mide la diferencia de potencial entre las dos sondas interiores. La corriente es transportada por iones en el líquido en los poros. La resistividad calculada depende de la distancia entre las sondas.

Preparación de la superficie del hormigón:

La superficie de hormigón no deberá estar revestida de ningún recubrimiento eléctricamente aislante y debería estar limpia. Si el hormigón está completamente seco, no será posible realizar ninguna medición ya que la corriente es conducida por iones en el líquido de los poros. Por lo tanto, es posible que sea necesario humedecer la superficie.

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macroelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

Estimación de la probabilidad de corrosión:

Las mediciones de resistividad podrán usarse para estimar la probabilidad de corrosión. Si la resistividad eléctrica (ρ) del hormigón es baja, aumentará la probabilidad de corrosión. Si la resistividad eléctrica es alta (p. ej. en el caso de hormigón seco y carbonatado), se reducirá la probabilidad de corrosión. Mediante pruebas empíricas se han obtenido los siguientes valores típicos para la resistividad medida, los cuales pueden ser usados para determinar la probabilidad de corrosión. Estos valores son válidos para cemento Portland corriente a 20°C (**Family, 2015**).

Tabla 2.16 Probabilidad de corrosión (Family, 2015)

Resultado	Probabilidad
En caso de ≥ 100 k Ω cm	Riesgo de corrosión insignificante
En caso de = 50 a 100 k Ω cm	Bajo riesgo de corrosión
En caso de = 10 a 50 k Ω cm	Riesgo de corrosión moderado
En caso de ≤ 10 k Ω cm	Alto riesgo de corrosión

Indicación de la velocidad de corrosión:

La siguiente interpretación de las mediciones de resistividad del sistema Wenner de cuatro sondas ha sido citada al referirse a acero despasivado.

Tabla 2.17 Velocidad de corrosión (Family, 2015)

Resultado	Probabilidad
> 20 k Ω cm	Velocidad de corrosión baja
> 10 -20 k Ω cm	Velocidad de corrosión baja a moderada
5-10 k Ω cm	Velocidad de corrosión alta
< 5 k Ω cm	Velocidad de corrosión muy alta

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

2.6.3 Permeabilidad al aire a edades 7 y 28 días (SIA_262/1, 2003)

Siendo la barrera defensiva contra la penetración de agentes agresivos (CO_2 , Cl^- , SO_4^{2-}), la permeabilidad del recubrimiento tiene una influencia decisiva sobre la durabilidad de las estructuras de hormigón. La composición del hormigón, el tipo de encofrado y los procesos de colocación y curado son los factores clave que determinan la calidad del hormigón de recubrimiento; de ahí la necesidad de medirla directamente en la estructura terminada. La Norma Suiza SIA_262:2003 establece: “La impermeabilidad del hormigón de recubrimiento debe verificarse mediante ensayos de permeabilidad (p.ej. midiendo la permeabilidad al aire) aplicados sobre la estructura o sobre testigos extraídos de la misma”. El *PermeaTORRTM* es un instrumento diseñado precisamente a ese fin: medir la permeabilidad al aire del hormigón de recubrimiento “in situ”, de manera rápida, repetible, confiable y no destructiva.

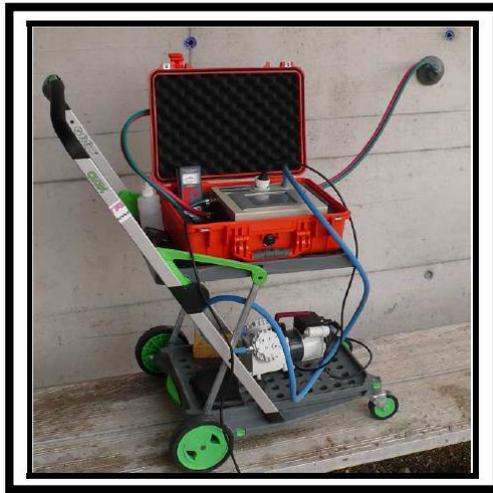


Fig 2.13 PermeaTORRTM

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macroelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

Interpretación de los resultados:

Tabla 2.18 Clases de Permeabilidad (SIA_262/1, 2003)

Clases de Permeabilidad en base a kT		
Clase	kT(10⁻¹⁶m²)	Permeabilidad
PK1	<0,01	Muy Baja
PK2	0,01-0,1	Baja
PK3	0,1-1,0	Moderada
PK4	1,0-10	Alta
PK5	10-100	Muy Alta
PK6	>100	Ultra Alta

2.7 Protocolo de la Macroelda. Metodología propuesta

En esta sección se describe el método y el procedimiento empleado en el experimento de corrosión del acero por el método de la macroelda.

Principio de funcionamiento del método de la macroelda (C.M. Hansson 2006):

- Carbonatación, lograr una completa carbonatación de la muestra en una cámara, suministrando CO₂ al 4%, hasta lograr una profundidad de carbonatación de hasta 50mm para lograr la difusión del CO₂ a través de los poros del hormigón.
- Circuito de macroelda, circuito de corrosión que se produce entre el ánodo y el cátodo a cierta distancia uno del otro.
- Modelo de corrosión de macroelda, es el modelo para calcular el potencial de media celda y la densidad de corriente dentro del circuito recién formado entre dos elementos a lo largo de las barras de refuerzo, calculando la caída óhmica.

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macroelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

- Interacción entre electrodos separados, se supone que no hay interacción entre electrodos separados, sin embargo, una vez que se inicia la corrosión, debe haber una interacción entre electrodos separados debido a la existencia de polarización.
- Reacciones de oxidación del acero, una vez que se tiene en cuenta la interacción entre electrodos separados, la polarización de activación es indispensable para generar la energía de activación esencial requerida para las reacciones de oxidación (fenómeno de corrosión).

Este último aspecto permite precisar el tiempo que demora en desencadenarse la corrosión del acero embebido en el hormigón a partir de la diferencia de potencial que se origina entre el acero inoxidable (electrodo de referencia) y el acero negro con el paso del tiempo, las cuales se miden a partir de un voltímetro.

Equipos y materiales empleados para la carbonatación de los especímenes:

1. Cámara de carbonatación.
2. Balón de CO₂ con regulador para comprobar que está pasando el 4% del área total.
3. Manguera para hacer pasar el CO₂.
4. Indicador para medir la carbonatación (fenolftaleína).

Equipos y materiales empleados para evaluación de la corrosión

1. Resistencia de 100 ohm conectada a ambos electrodos (acero negro y acero inoxidable).
2. Voltímetro para medir la corriente.

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macroelda para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

2.7.1 Ensayo de la macroelda. Procedimiento y desarrollo (Elsener et al., 2003)

Producto a problemas experimentales y consigo, el corto tiempo de ensayo (96 horas), no se desarrolló la fase experimental referente a la carbonatación de los especímenes. Como resultado, solo se expondrá la fase experimental llevada a cabo para la serie sin carbonatar.

Procedimiento experimental

1. Preparación de los moldes, con listones de madera incluida para sostener las barras de acero.
2. Humedecer la superficie de los especímenes con un atomizador con agua destilada para garantizar el medio húmedo dentro del hormigón y así acelerar el proceso de corrosión.
3. Medir durante dos meses, al menos 2 veces al día. Este es el tiempo ideal para llevar a cabo este ensayo, pero solo se reportarán mediciones por 72 horas.

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocela para la evaluación de la corrosión de los especímenes de hormigón armado, fabricados con cementos PP-35 y LC3

2.8 Conclusiones parciales del capítulo:

1. Los áridos naturales empleados provenientes de la cantera el Purio, no cumplen con los requisitos establecidos en la norma cubana, NC 251:2013, lo cual constituye un problema de índole nacional, dado que la industria del árido cubano no cuenta con la tecnología necesaria para llevar a cabo esta tarea.
2. El diseño de mezcla propuesto para la elaboración de hormigones con LC³ muestra que la dosis de aditivo es duplicada, dado que estas presentan mayor absorción de agua debido a la elevada superficie específica que presentan dichos cementos.
3. La preparación del cemento LC³-50 se llevó a cabo mezclando cemento LC² (con arcilla del yacimiento de Yaguajay) con P-35 (fabricado en la fábrica de cemento de Siguaney) en proporción 50% / 50% (peso).

Capítulo III: Evaluación del grado de corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón fabricados con LC3- 50 y P-35

Capítulo III: Evaluación del grado de corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón fabricados con LC³- 50 y P-35

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos a partir de la caracterización del hormigón tanto en estado fresco como endurecido, para así evaluar su comportamiento y además compararlo con las diferentes normas, estableciendo un análisis cuantitativo, de las características del P-35 y LC³- 50. Para ello determinamos las propiedades físico-mecánicas de los hormigones elaborados a partir de los estudios de consistencia, resistencia mecánica, resistividad y permeabilidad del hormigón en estado endurecido a los 7 y 28 días para cada ensayo. Finalmente, se exponen los resultados previos del estudio de la corrosión del acero de refuerzo a través del método propuesto en el capítulo anterior (Método de la Macrocelda).

3.1 Ensayos del hormigón en estado fresco

Consistencia por el cono de Abrams

Uno de los ensayos realizados al hormigón fresco fue el de consistencia mediante el cono de Abrams en el cual se pretendían lograr asentamientos fijados entre 120 y 140 mm logrando consistencias entre plásticas y blandas, según la NC 174-2002. Para el mismo fue necesario aplicar dosis de aditivos variando para cada tipo de cemento y no para el tipo de mezcla o sea el porcentaje de aditivo con respecto a la cantidad de cemento a emplear se mantuvo constante. A continuación, se exponen los resultados de este ensayo.

Capítulo III: Evaluación del grado de corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón fabricados con LC3- 50 y P-35

Tabla 3.1: Resultado de consistencia

Tipo de hormigón	Asentamiento (mm)
P-35	130
LC ³	130

Los resultados de consistencia obtenidos en la producción de ambas mezclas (P-35 y LC³), se encuentran en el rango establecido para la implementación de este método, lo cual indica que la combinación cemento/áridos y su relación con el agua, son las adecuadas para lograr las propiedades fundamentales de la mezcla fresca primero (consistencia), y endurecida luego (resistencia).



Fig. 3.1 Consistencia por el Cono de Abrams.

Capítulo III: Evaluación del grado de corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón fabricados con LC3- 50 y P-35

3.2 Ensayos del hormigón endurecido

3.2.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión constituye uno de los principales ensayos realizados al hormigón endurecido para comparar el LC³ y P-35, en cuanto a este parámetro. Se ensayaron a compresión una serie de 3 especímenes a 7 y 28 días de edad. A continuación, se detallan los valores de las resistencias a compresión obtenidas:

Tabla 3.2: Resultados obtenidos a partir del ensayo de rotura los 7 y 28 días

Tipo de hormigón	Resistencia (MPa) Edad 7 Días	Resistencia (MPa) Edad 28 Días
LC ³ -50	17	34
P-35	46	54

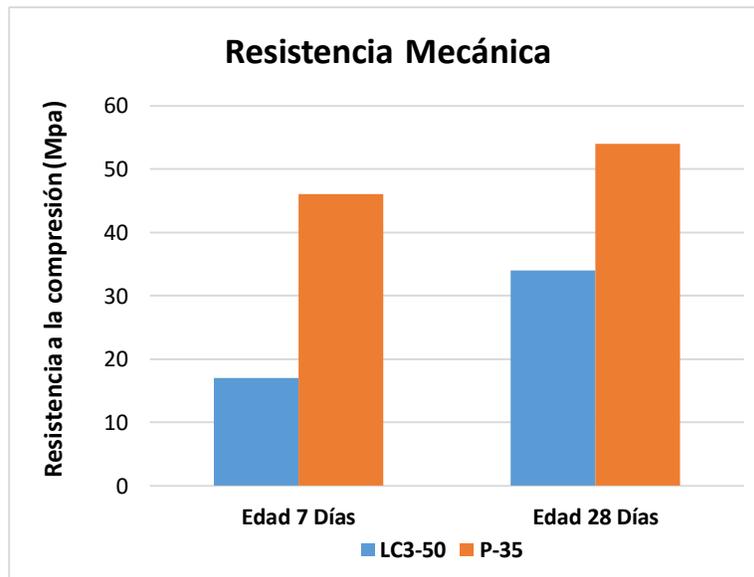


Gráfico 3.1 Resistencia mecánica de hormigones fabricados con cementos LC³ y P-35.

Capítulo III: Evaluación del grado de corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón fabricados con LC3- 50 y P-35

Como se observa, ambos hormigones cumplen con la resistencia requerida para considerar una buena preparación de la mezcla, ya que ambos cumplen con la resistencia propuesta para el diseño de mezcla inicial.

3.2.2 Permeabilidad al aire

Es de vital importancia el estudio de la permeabilidad del hormigón en estado endurecido, ya que nos da la idea de la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para 7 y 28 días de edad, en el hormigón endurecido. Según la norma (SIA_262/1, 2003), ambos hormigones presentan una permeabilidad baja, lo cual significa que tanto la composición del hormigón, el tipo de encofrado así como los procesos de compactación y curado, se llevaron a cabo siguiendo la normativa estudiada; por lo que los dos hormigones presentan una buena calidad.

Tabla 3.4 Resultados obtenidos a partir de los 7 y 28 días

Tipo de hormigón	Resultado Edad 7 Días kT ($10^{-16}m^2$)	Resultado Edad 28 Días kT ($10^{-16}m^2$)
LC ³ -50	0,0520	0,0014
P-35	0,0275	0,0220

3.2.3 Resistividad

La resistividad constituye uno de los ensayos más importantes en este estudio, ya que el mismo nos brinda un criterio de la posible ocurrencia o no de la corrosión del

Capítulo III: Evaluación del grado de corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón fabricados con LC3- 50 y P-35

acero en el hormigón reforzado. Comparando los valores obtenidos de resistividad con los criterios reportados en el manual del equipo Resipod Family, Tablas 2.16 y 2.17 (manual implementado para establecer comparaciones con los resultados obtenidos), podemos observar que a la edad de 7 días ambos hormigones presentan un alto riesgo y de velocidad de corrosión alta; mientras que a los 28 días el hormigón fabricado con cemento P-35 continúa con las características anteriores, sin embargo, el fabricado con el cemento LC³ presenta una velocidad de corrosión baja o moderada, con un riesgo de corrosión moderado; como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.3 Resultados obtenidos a partir de los 7 y 28 días

Tipo de cemento	Resistividad promedio (kΩcm)	Temperatura Promedio (°C)	Resistividad promedio (kΩcm)	Temperatura Promedio (°C)
	Edad 7 Días	Edad 28 Días	Edad 7 Días	Edad 28 Días
LC ³ -50	5,65	23,5	17,12	22,6
P-35	6,35	24,4	7,76	23,5

3.3 Resultados previos del protocolo de la Macroelda

A continuación, se presentan los resultados preliminares del modelo de evaluación a partir del ensayo de la Macroelda. Solo se reportarán en este estudio lecturas de corriente durante 96 horas de ensayo. El autor de la presente investigación está consciente y propone como tiempo de ensayo al menos 2 meses, pero debido a las difíciles condiciones y problemas experimentales enfrentados durante el estudio, solo se colectaron 4 días de datos.

Capítulo III: Evaluación del grado de corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón fabricados con LC3- 50 y P-35

Tabla 3.4 Valores de corriente (I) para hormigones armados, recubrimiento 30 mm

Tiempo (horas)	4	8	12	28	32	48	52	56	72	76	80	96
I (mA) LC³	0,605	0,645	0,670	0,580	0,640	0,760	0,505	0,520	0,740	0,620	0,645	0,530
I (mA) P-35	0,320	0,710	0,470	0,860	1,020	0,810	0,730	1,000	0,310	0,605	0,675	0,605

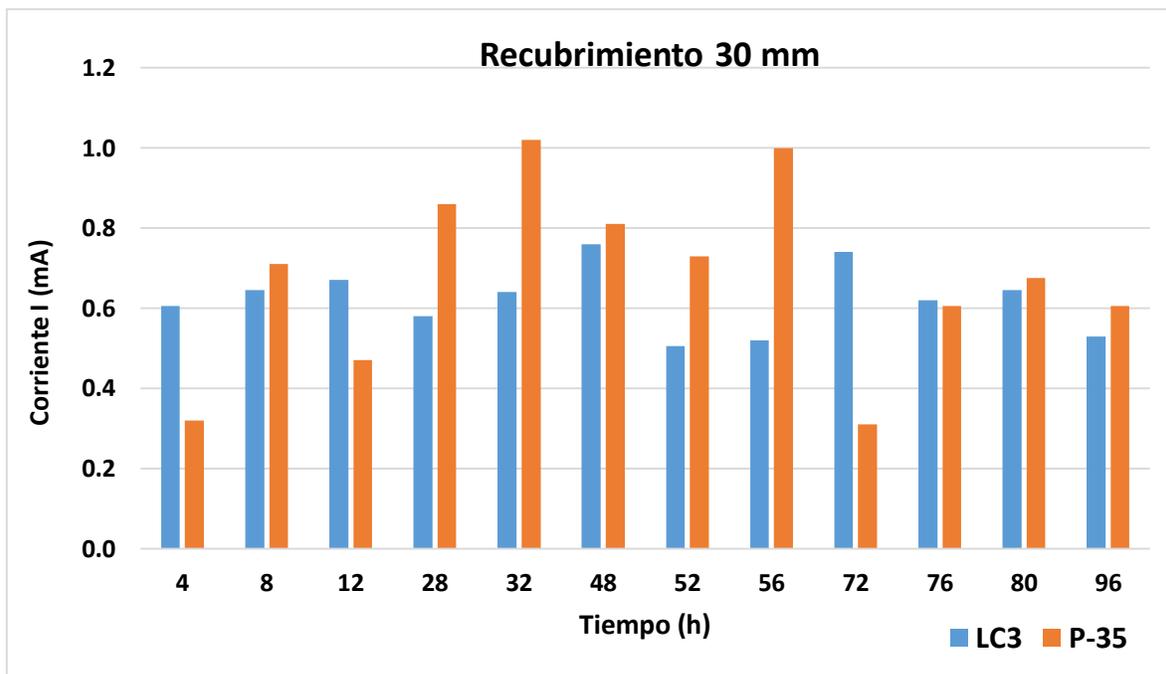


Gráfico 3.2 Valores de corriente (I) para hormigones armados, recubrimiento 30 mm.

Como se muestra en el gráfico 3.2, la mayoría de las lecturas para los hormigones producidos con cemento P-35 presentan valores mayores que para los hormigones de LC³. Esto indica un mayor grado de corrosión para el primero siendo este el más propenso a este fenómeno debido a un mayor contenido de portlandita que reacciona a mayor escala con el CO₂, provocando un aumento de la concentración

Capítulo III: Evaluación del grado de corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón fabricados con LC3- 50 y P-35

de CaCO_3 como producto principal de la reacción, lo cual conlleva a una disminución del pH del medio favoreciendo la despasivación del acero de refuerzo.

Tabla 3.5 Valores de corriente (I) para hormigones armados, recubrimiento 15 mm

Tiempo (horas)	4	8	12	28	32	48	52	56	72	76	80	96
I (mA) LC ³ (recubrimiento 15 mm)	0,875	1,160	0,760	0,990	0,850	0,870	0,960	0,810	0,920	0,845	0,740	0,870
I (mA) P-35 (recubrimiento 15 mm)	0,790	0,860	0,860	0,880	0,875	0,825	0,875	0,940	0,790	0,855	0,845	0,850

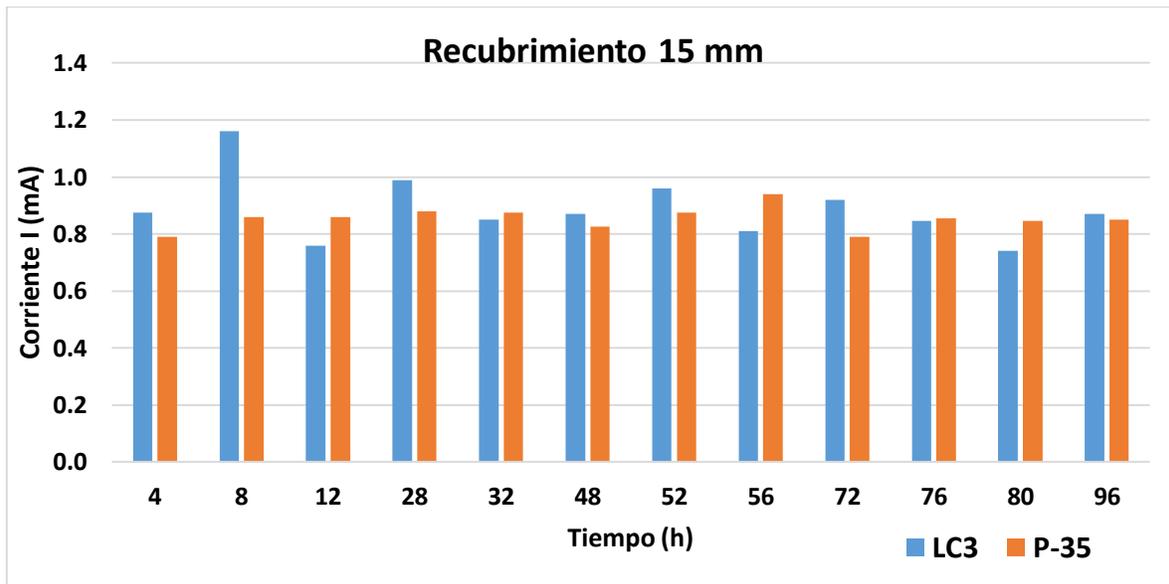


Gráfico 3.3 Valores de corriente (I) para hormigones armados, recubrimiento 15 mm.

Cuando se emplea un recubrimiento del acero menor (15 mm), se observa que ambos hormigones presentan un comportamiento similar en el transcurso del tiempo.

Capítulo III: Evaluación del grado de corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón fabricados con LC3- 50 y P-35

Sin embargo, cuando comparamos ambos recubrimientos, podemos demostrar que a un menor recubrimiento existen mayores valores de corriente, lo cual es un indicio de la posible ocurrencia de la corrosión a una mayor velocidad que para el caso del recubrimiento de 30 mm. Este comportamiento se puede atribuir a que los aceros con menor recubrimiento están expuestos en mayor medida al efecto de la humedad relativa y temperatura ambiental, factores que influyen directamente en el grado de corrosión del acero de refuerzo, fenómenos explicados en el sub-epígrafe 1.5.3.

Respecto al diseño experimental propuesto en el capítulo 2, al analizar los resultados obtenidos podemos plantear que el método presenta deficiencias debido a la irregularidad encontrada en los resultados. Los principales factores experimentales que pudieran influir directamente en las mediciones son:

- Estado de la superficie del metal expuesto a la atmósfera. Aunque se limpiaron antes de cada medición, es posible que una pequeña capa de óxido actuara como resistencia al paso de la corriente eléctrica.
- Mal contacto entre la resistencia y los aceros.
- Mal contacto entre las puntas del multímetro y el punto de medición.
- Los valores de corriente son muy pequeños, dado que existe una menor concentración de iones y electrones en el medio.
- La resistencia empleada para las mediciones (100 Ω) puede que sea muy alta y consume la intensidad de la corriente que circula a través del circuito eléctrico.
- Las muestras estudiadas no estaban expuestas a condiciones ambientales estables de temperatura y humedad.

Capítulo III: Evaluación del grado de corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón fabricados con LC3- 50 y P-35

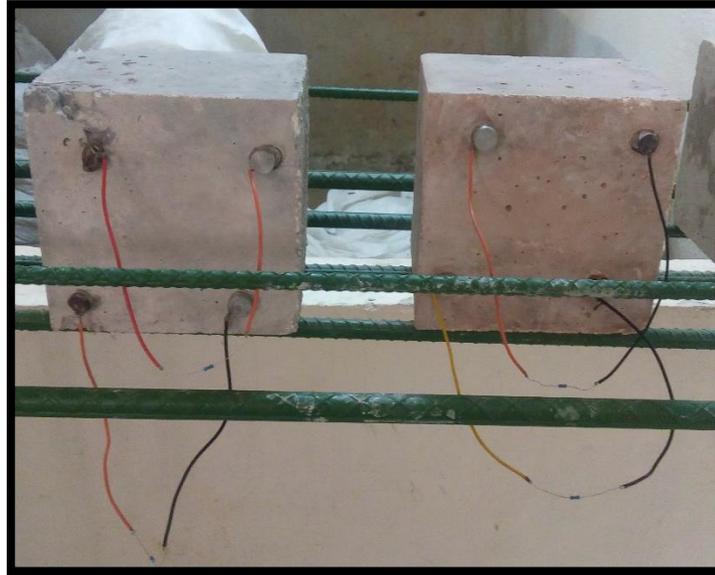


Fig. 3.2 Especímenes para evaluar el grado de corrosión por el método de la Macrocela.

Conclusiones generales

Conclusiones Generales

1. La caracterización de los cementos LC² y P-35 cumplen con los requisitos establecidos en la norma NC 96:2011 “Cemento con adición activa. Especificaciones” para ser empleados en la fabricación de hormigones. Sin embargo, los áridos destinados a este estudio no cumplen con la norma NC 251:2013 debido a que la industria del árido no consta con la tecnología adecuada para ofrecer un producto con un mejor acabado.
2. Los hormigones producidos presentan una buena calidad, ya que ambos muestran una adecuada resistencia mecánica a los 28 días (LC³: 34MPa y P-35: 54MPa) y baja permeabilidad. Con respecto a la resistividad, a los 7 días ambos hormigones exhiben un alto riesgo y velocidad de corrosión alta, sin embargo, a los 28 días de curado, el P-35 mantiene este comportamiento mientras que el fabricado con cemento LC³ presenta una velocidad de corrosión baja o moderada, con un riesgo de corrosión moderado.
3. Se logró evaluar en tiempo real el grado de corrosión del acero en especímenes de hormigón fabricados con cemento LC³ y P-35 mediante la propuesta de procedimiento del método de la Macroelda.
4. Los valores de corriente directa indican que pudiera existir un mayor grado de corrosión para los hormigones fabricados con P-35 para un recubrimiento del acero de 30 mm, siendo este efecto similar para ambos hormigones cuando disminuye el recubrimiento hasta 15 mm.
5. El efecto de la corrosión del acero se ve influenciado por el recubrimiento, ya que cuando este es mayor (30mm) los valores de corriente son menores que en un recubrimiento de 15mm, lo cual pudiera atribuirse a que en este último el acero está más expuesto a la difusión del CO₂ y a los efectos de temperatura y humedad relativa.

Recomendaciones

Recomendaciones

1. Evaluar el efecto de la carbonatación en la corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigones elaborados con cementos LC³ y P-35.
2. Corregir las posibles fuentes de errores detectadas en el montaje del ensayo de la Macroelda.
3. Llevar a cabo el método de la Macroelda en una cámara de curado para mantener constante temperatura y humedad relativa en vísperas de lograr una homogenización de las mediciones.

Referencias bibliográficas

Referencias bibliográficas

1. ALUJAS, A., FERNÁNDEZ, R., MARTIRENA, F. & QUINTANA, R. 2010. Empleo de arcillas caoliníticas de bajo grado activadas térmicamente como una alternativa para el reemplazo parcial de cemento Pórtland. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 41, 1-10.
2. BABICHE, I. 2010. *CARBONATACIÓN DEL RECUBRIMIENTO DE CONCRETO*, Lima, Perú, Dirección General de Instalaciones.
3. BELLO, P. M. 2013. *Determinación de la Velocidad de Corrosión en Armaduras Mediante Técnicas Cuantitativas de Análisis Electroquímico*. Universidad Politécnica de Valencia.
4. BETANCOURT, S. 2013. Otras propiedades del hormigón endurecido. *Conferencia 6*. Facultad de Construcciones.
5. BIOUBAKHSH. 2011. *The penetration of chloride in concrete subject to wetting and drying: measurement and modelling*. (University College London).
6. BROOMFIELD, J. P. 1997. *Corrosion of steel in Concrete*. Taylor and Francis e - Library ed. London and New York: E and FN Spon.
7. C.M. HANSSON , A. P., A. LAURENT 2006. Corrosión de macroceldas y microceldas de acero en cemento Portland ordinario y hormigón de alto rendimiento. *In: WATERLOO, U. O.* (ed.). Ontario, Canada Department of Mechanical Engineering.
8. DEL VALLE MORENO, A., PÉREZ LÓPEZ, T. & MARTÍNEZ MADRID, M. 2001. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. *Publicación técnica*.
9. ELSENER, B., ANDRADE, C., GULIKERS, J., POLDER, R. & RAUPACH, M. 2003. Hall-cell potential measurements—Potential mapping on reinforced concrete structures. *Materials and Structures*, 36, 461-471.
10. FAMILY, R. 2015. Manual de operación. Ensayos de durabilidad de hormigón. Schwerzenbach, Suiza.
11. FAMIQ. 2016. *Famiq S.R.L. Aceros Inoxidables* [Online]. Buenos Aires, Argentina. Available: soporteweb@famiq.com.ar 21/06/2017].
12. GONZÁLEZ, J. A. & MIRANDA, J. M. 2007. Corrosión en las estructuras de Hormigón Armado: fundamentos, medida, diagnosis y prevención.
13. GORDON PING GU, J. J. B., AND & RAMACHANDRAN, V. S. *Techniques for Corrosion. Investigation in Reinforced Concrete*.

Referencias bibliográficas

14. LAFFELY, J. & SCRIVENER, K. 2014. Project Documentation Low Carbon Cement (LCC).
15. MAPEI 2000. Dynamon SX32.
16. MARTIRENA, J. F. 2003. *Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa*. PhD, Universidad Central de Las Villas.
17. NC_95 2011. Cemento Pórtland. Especificaciones.
18. NC_96 2011. Cemento con adición activa — especificaciones
19. NC_120 2014. Hormigón Hidráulico. Especificaciones.
20. NC_174 2002. Hormigón fresco. Determinación del asentamiento por el cono.
21. NC_221 2002. Hormigón. Elaboración de probetas para ensayos.
22. NC_250 2005. Requisitos de durabilidad para el diseño y construcción de edificaciones y obras civiles de hormigón estructural, Cuba.
23. NC_251 2013. Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos.
24. NC_353 2004. Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones.
25. NC_355 2004. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio.
26. NC_506 2013. Cemento hidráulico — Método de ensayo — Determinación de la resistencia mecánica.
27. NC_752 2010. Barras de acero soldada para refuerzo de hormigón-Especificaciones.
28. PÉREZ, L. R. 2010. *Vida útil residual de estructuras de hormigón armado afectadas por corrosión*. Caminos.
29. RODRÍGUEZ, S. B. 2012. Consistencia y laborabilidad del hormigón.
30. SCRIVENER, K. 2007. Durability course. EPFL, Switzerland.
31. SIA_262/1 2003. Concrete Structures – Supplementary specifications. Zurich: Société suisse des ingénieurs et des architectes.
32. SOHAIL, M. G., LAURENS, S., DEBY, F. & BALAYSSAC, J. P. 2013. Significance of macrocell corrosion of reinforcing steel in partially carbonated concrete: numerical and experimental investigation. *Materials and Structures*.
33. TSUYOSHI, M. & HITOSHI, T. 2007. Simulation of steel corrosion in concrete based on the Model of Macro-Cell Corrosion Circuit. *Advanced Concret Technology*, 5, 343-362.

Referencias bibliográficas

34. TSUYOSHI MARUYA , H. T., KENICHI HORIGUCHI , SATORU KOYAMA AND KAI-LIN HSU 2007. Simulation of Steel Corrosion in Concrete Based on the Model of Macro-Cell Corrosion Circuit. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5.
35. UMACON. 2016. *Qué es el Cemento Portland?* [Online]. Zaragoza, España. Available: <http://www.umacon.com/noticia.php/es/que-es-el-cemento-portland-tipos-y-caracteristicas/413> [Accessed 21/06/2017 2017].
36. VILLANUEVA, M. L. 2012. La carbonatación en el concreto reforzado. *In: IMCYC (ed.)*. Mexico.
37. VIZCAÍNO, L. 2014. *CEMENTO DE BAJO CARBONO A PARTIR DEL SISTEMA CEMENTICIO TERNARIO CLÍNQUER – ARCILLA CALCINADA – CALIZA*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.