

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Montaje del protocolo de evaluación de la corrosión del acero de refuerzo en hormigones de LC^3 , mediante el método de corriente impresa.

Autor: Claudia Arbona Armas

Tutores: Dr. Adrián Alujas Díaz

Lic. Elizabeth Cabrera Apolinaire

Santa Clara 2017

“Año 59 de la Revolución”

PENSAMIENTO

***“Intenta no volverte un hombre de éxito,
sino volverte un hombre de valor.”***

Albert Einstein

DEDICATORIA

*La vida nos da lecciones y nos enseña que somos víctimas de las separaciones por circunstancias queridas o no, este trabajo es el de muchas caídas, pero también el de muchos esfuerzos de levantarse y demostrarte a ti mismo eres mucho más fuerte de lo que piensas, porque detrás tienes todo un mundo de personas que están dispuestos a sujetar esa cuerda para que llegues a la cima.
A mi padre.*

AGRADECIMIENTOS

Al hombre que mantuvo el amor en la familia y ha constituido un digno ejemplo a seguir, mi abuelo Eladio, Pipo donde quiera que estés.

A mi papá por ser mi mejor amigo, mi apoyo incondicional, por confiar en mis decisiones y apoyarme en todas mis locuras.

A mi madre por hacer que tomará la mejor de mis decisiones de venir a estudiar la ingeniería en esta universidad.

A mis hermanas por su amor y espero que un día vean en mi un ejemplo a seguir.

A mi abuela por una niñez tan especial y por estar ahí en momentos muy difíciles.

A mi tía Meidy por ser mi cómplice, mi amiga y mi familia cuando más lo he necesitado.

A Lisi, Sureli y Daylis, nunca pensé encontrar otra familia, tan igual y tan diferente pero tan mía, los lazos sanguíneos no nos unen pero el amor, el cariño y lo vivido nos dice que no son necesarios.

A mis amigas Vivi, Gise y la Negra, por todos estos años de contención, por todos los buenos momentos y los malos también, porque hicieron nuestra hermandad más fuertes, por ser auténticas, por permitirme contar con ustedes y hacer de estos seis años los mejores de mi vida.

A la familia de calle Danielito que me adoptó y me cuidó durante estos años, gracias.

A los amigos más jóvenes Lisett, Liz Claudia, Blasa, Félix y Elier por abrirme sus corazones al llegar de última, por soportar mis broncas, por los momentos compartidos y espero que hayan encontrado en mí una hermana y amiga.

A Maruchi por ser mi amiga y guardiana, gracias por ser tan auténtica y carismática.

A mi tutora Elizabeth por ayudarme y guiarme en cada proceso de la investigación y a Adrián por su colaboración y ayuda.

A mis demás familiares por el apoyo y mis compañeros de aula, de ambos cursos por haber formado parte de esta experiencia.

A Dariel por ser mi tabla de sostén durante muchos años, por su amistad y por tan especial.

RESUMEN

La durabilidad del hormigón armado se ve afectada por el transporte o la penetración de iones cloruros a través la matriz cementicia, generando corrosión en el acero de refuerzo y por consiguiente el deterioro en el hormigón. El presente trabajo propone el montaje de un protocolo de ensayo para medir el grado de corrosión del acero de refuerzo en hormigones producidos con cemento LC³, debido a la penetración de cloruros, tomando como base el método de corriente impuesta. Los hormigones ensayados fueron elaborados a nivel de laboratorio, cumpliendo con los criterios de asentamiento por cono de Abrams según la NC 174:2002.

Los ensayos de resistencia a compresión a 7 y 28 días demostraron que los hormigones producidos con cemento LC³ a pesar de tener valores inferiores a los hormigones con P-35, cumplen con los parámetros establecidos en la NC 120:2014. Según la norma ASTM C1202:2010, estos hormigones presentan una permeabilidad baja, resultando de buena calidad. En términos de resistividad, a los 7 días de curado ambos hormigones muestran un elevado riesgo y velocidad de corrosión alta; mientras que a los 28 días el hormigón con P-35 muestra el mismo comportamiento, sin embargo, el producido con cemento LC³ presenta un riesgo y velocidad de corrosión moderada, lo cual justifica que el hormigón producido con P-35, al ser expuesto a un potencial de 15V, los valores de corriente obtenidos sean más elevados que con LC³ a las 48h de medición.

Palabras clave: durabilidad, hormigón, corrosión, transporte, ion cloruro.

ABSTRACT

The durability of reinforced concrete is affected by the transport or penetration of chloride ions through the cementitious matrix, generating corrosion in the reinforcing steel and consequently the deterioration in the concrete. The present work proposes the assembling of a test protocol to measure the degree of corrosion of reinforcing steel in concretes produced with LC³ cement, due to the penetration of chlorides, based on the imposed current method. The concretes tested were elaborated at laboratory level, complying with the Abram's cone criteria according to NC 174: 2002.

The compressive strength tests at 7 and 28 days show that concrete produced with LC³ cement, despite having lower values than concrete with P-35, comply with the parameters established in CN 120: 2014. According to ASTM C1202: 2010, these concretes have a low permeability, resulting in good quality. In terms of resistivity, at 7 days of curing both concretes show a high risk and high corrosion rate, while at 28 days the concrete with P-35 shows the same behavior, however, the one produced with LC³ cement presents a moderate risk and corrosion rate. This behavior could justify that the concrete produced with P-35, when exposed to a potential of 15V, the current values obtained are higher than with LC³ at 48h of measurement.

Key words: durability, concrete, corrosion, transport, ion chloride.

GLOSARIO

CO_2 (dióxido de carbono)

AgNO_3 (nitrato de plata)

C_3S (silicato tricálcico o alita)

C_2S (silicato bicálcico o belita)

C_3A (aluminato tricálcico)

C_4AF (ferrito aluminato tetracálcico o celita)

CSH (gel de tobermorita)

CH (portlandita)

AFt (etringita)

AFm (monosulfoaluminatos)

NO_2 (dióxido de nitrógeno)

SO_2 (dióxido de azufre)

Ag (plata)

AgCl (cloruro de plata)

NaOH (hidróxido de sodio)

Ca(OH)_2 (hidróxido de calcio)

H_2O (agua)

KOH (hidróxido de potasio)

NaCl (cloruro de sodio)

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
GLOSARIO	VI
TABLA DE CONTENIDOS	VII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: FUNDAMENTACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO, EN EL HORMIGÓN ARMADO ..	5
1.1 Generalidades del hormigón hidráulico	5
1.2 Cemento Portland Ordinario (CPO). Generalidades	7
1.2.1 Fabricación, composición e hidratación del cemento Portland ...	8
1.3 Materiales cementicios suplementarios (MCS)	11
1.3.1 Cemento con adiciones minerales. Cemento de bajo carbono (LC ³)	14
1.4 Durabilidad de las estructuras de hormigón	15
1.5 Corrosión del acero de refuerzo. Fenómeno en el hormigón	16
1.5.1 Causas y mecanismo de corrosión	17
1.5.2 Carbonatación	18
1.5.3 Cloruros	19
1.6 Mecanismos de transporte de iones cloruros en el hormigón	22
1.6.1 Permeabilidad	23
1.6.2 Absorción	24
1.6.3 Difusión del cloruro en el hormigón	25
1.7 Influencia del ambiente marino en el comportamiento del hormigón hidráulico	27
1.8 Técnicas de medición del ingreso del ion cloruro en el hormigón ..	27
1.8.1 Técnicas destructivas para la evaluación in situ de cloruros	28
1.8.2 Métodos no destructivos para la evaluación in situ del cloruro.	28
1.8.3 Ensayo de migración de cloruros en el hormigón	29
1.9 Conclusiones parciales del Capítulo I	31

Tabla de contenidos

CAPÍTULO II: DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA A APLICAR EN EL MÉTODO DE CORRIENTE IMPUESTA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO.....	32
2.1 Diseño experimental de mezclas de hormigón para especímenes ..	32
2.2 Caracterización de los materiales constituyentes del hormigón.....	32
2.2.1 Cementos	32
2.2.2 Áridos	34
2.2.3 Aditivo.....	36
2.2.4 Agua de amasado	38
2.3 Acero negro	38
2.3.1 Acabado del acero	39
2.4 Fabricación del hormigón	40
2.4.1 Dosificación de las mezclas de hormigón empleadas	40
2.4.2 Moldes empleados.....	41
2.4.3 Llenado de probetas, compactación y conservación.....	41
2.5. Protocolo de corriente impuesta. Metodología aplicada.....	42
2.5.1 Materiales, instrumentos y equipos empleados en el método de corriente impuesta.....	43
2.5.2 Medios de protección utilizados.....	44
2.6 Ensayo de corriente impuesta. Procedimiento desarrollado	44
2.6.1 Limpieza de acero.....	44
2.6.2 Aplicación de resina epóxica.....	44
2.6.3 Preparación de los especímenes	45
2.6.4 Mediciones	46
2.6.5 Corrosión del acero	46
CAPÍTULO III: EVALUACIÓN DEL GRADO DE CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO DEBIDO A LA PENETRACIÓN DE IONES CLORUROS	47
3.1 Producción de hormigón.....	47
3.2 Ensayos del hormigón endurecido	48
3.2.1 Resistencia a compresión.....	48
3.2.2 Permeabilidad al aire	49
3.2.3 Resistividad.....	50
3.3 Análisis preliminar del método de corriente impuesta.....	50
CONCLUSIONES GENERALES	52

Tabla de contenidos

RECOMENDACIONES	53
------------------------------	-----------

INTRODUCCIÓN

La elevada producción de Cemento Portland Ordinario (CPO) ha resultado ser uno de los principales responsables de la degradación del medio ambiente, al ser el responsable de aproximadamente el 8% de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera (Habert, 2009). Si se le compara con otros materiales de construcción, los costos energéticos y de emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de masa del CPO son muy bajos, pero son sus altos volúmenes de producción los responsables de efectos tan negativos para el medio ambiente, en un momento en que el cuidado del entorno y la eficiencia en la utilización de los recursos energéticos deben estar entre las principales prioridades.

Han sido varias las alternativas estudiadas con el enfoque de minimizar tales impactos y entre las soluciones más extendidas a este problema, se encuentra el empleo de adiciones minerales con carácter puzolánico, o puzolanas, como sustitutos parciales de cemento, lo cual contribuye al mejoramiento de determinadas propiedades en los hormigones, tales como: menor calor de hidratación, resistencias mecánicas superiores, alta resistencia ante sulfatos y baja permeabilidad y reactividad álcali-agregado (Martirena, 2003). Al mismo tiempo, la utilización de materiales cementicios suplementarios (MCS), favorece la disminución en el empleo de energías no renovables y contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero por cantidad de aglomerante (Habert, 2009).

Si bien las cenizas volantes, las escorias de altos hornos y el humo de sílice se encuentran dentro de las puzolanas de más amplia utilización, todos estos materiales derivan de procesos y tecnologías industriales no siempre disponibles. Por tales motivos el empleo de arcillas calcinadas, ya sean ricas o de pobre contenido de caolinita, se ha convertido en una fuente de materiales puzolánicos (Ambroise et al., 1994).

La elevada demanda de aglomerantes en Cuba, debido a las necesidades constructivas propias de un país en vía de desarrollo y la indisponibilidad de puzolanas, llevaron a especialistas pertenecientes al Centro de Investigación y Desarrollo de Estructura y Materiales (CIDEM) de la Universidad Central "Marta

Introducción

Abreu" de Las Villas, en conjunto con un equipo técnico del Instituto Federal de Tecnología de Lausana (EPFL), en Suiza a trabajar en una propuesta de cemento ternario (LC³) que se basa en la sustitución de un elevado por ciento de clínquer por una combinación de arcilla calcinada y carbonato de calcio en forma de piedra caliza. La utilización de la arcilla calcinada y la piedra caliza se realiza mayormente en pequeñas cantidades de hasta un 35% (Weerdt, 2011) y según el CIDEM, el LC³ está compuesto por un 48% de clínquer, 30% arcilla calcinada, 15% de piedra caliza y un 7% de yeso.

Evaluaciones previas del LC³ prueban un alto rendimiento cuando es empleado como hormigón reforzado con acero. Sin embargo, los bajos niveles de clínquer pueden traer consigo el fenómeno de corrosión debido al ataque por penetración de cloruros, nitratos y sulfatos al acero embebido en el hormigón, en ambientes donde la salinidad del medio es relativamente elevada. Esta oxidación o corrosión del refuerzo metálico, afecta significativamente las características funcionales del concreto armado tales como la adherencia, además de inducir la formación de agrietamientos, lo que compromete la integridad estructural. Hasta el momento, son escasas las investigaciones referentes a la velocidad de fisuración de hormigones de LC³, como consecuencia del ataque por penetración de cloruros al refuerzo metálico, por lo que se plantea como **problema científico de la investigación**: *¿Cómo evaluar la corrosión inducida como resultado del ataque por penetración de iones cloruros, en la fisuración (agrietamiento) de sistemas acero-hormigón LC³?*

Objetivo general: Diseñar la metodología del método de corriente impuesta (lollipop) para evaluar el efecto de la corrosión debido al ataque por penetración de cloruros, en la fisuración de sistemas acero-hormigón LC³.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar los materiales empleados en la fabricación de los hormigones hidráulicos producidos.
2. Elaborar una propuesta metodológica del método de corriente impuesta (lollipop) para evaluar el efecto de la corrosión del acero de refuerzo, debido al ataque por penetración de cloruros.

Introducción

3. Evaluar el efecto de la corrosión inducida como resultado del ataque por penetración de iones cloruros, en la fisuración (agrietamiento) de sistemas acero-hormigón LC³.

Tareas científicas de investigación:

1. Revisión de la literatura científica publicada acerca del mecanismo de corrosión debido al ataque por penetración de iones cloruros, así como los factores que influyen en este efecto y los principales métodos empleados para determinar el perfil de cloruros.
2. Caracterización de los materiales constituyentes empleados en los hormigones producidos.
3. Diseño del protocolo del método de corriente impuesta (lollipop) para evaluar la velocidad de fisuración de los especímenes.
4. Montaje del protocolo de los lollipods para realizar mediciones de corriente producida en el sistema.

Novedades científica-técnica: Resulta novedoso estudiar el comportamiento de hormigones producidos con el cemento de bajo carbono LC³ con respecto a los fabricados con el cemento Portland P-35, al evaluar la influencia del fenómeno de migración de iones cloruros en la fisuración del hormigón, mediante el método de corriente impuesta, contribuyendo de esta forma a la incursión de este tipo de estudio en nuestro país, particularmente en el CIDEM.

Aporte medio ambiental: La implementación del cemento de bajo carbono LC³ con sustituciones de clínquer de hasta un 45%, en lugar del Cemento Portland Ordinario, reduce significativamente las emisiones de CO₂ al medio ambiente y mejora la durabilidad y vida útil de las estructuras sometidas a diferentes niveles de agresividad.

Estructura del Trabajo de Diploma:

- ✓ **Resumen / Abstract**

Introducción

- ✓ **Introducción:** Se detallan los elementos metodológicos e investigativos de la presente investigación.
- ✓ **Capítulo I:** Fundamentación del comportamiento de la corrosión del acero de refuerzo, en el hormigón armado.
- ✓ **Capítulo II:** Desarrollo de la metodología a aplicar en el método de corriente impresa para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo.
- ✓ **Capítulo III:** Evaluación del grado de corrosión del acero de refuerzo debido a la penetración de iones cloruros.
- ✓ **Conclusiones**
- ✓ **Recomendaciones**
- ✓ **Referencias bibliográficas**

CAPÍTULO I: FUNDAMENTACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO, EN EL HORMIGÓN ARMADO

En este capítulo se argumentan los temas relacionados con el hormigón armado su comportamiento y materiales que lo componen, así como su durabilidad ante varios ambientes, los mecanismos de transporte de los iones cloruro, específicamente el de difusión y los métodos y técnicas de medición del ion cloruro en el hormigón.

1.1 Generalidades del hormigón hidráulico

El hormigón es un material de muy amplia utilización por su sencillez de ejecución, el escaso coste de sus componentes y las aceptables resistencias alcanzadas, a partir de sencillas reglas de dosificación.

El hormigón hidráulico es caracterizado principalmente por su resistencia mecánica, esta propiedad por lo general determina las propiedades duraderas que puede presentar dicho material, ya que al ser más resistente podría ser más impermeable. Materiales como el cemento, los áridos (agregados); la dosificación de la mezcla del hormigón y la ejecución en obra, influyen en la resistencia mecánica y sus propiedades durables. Existen diferentes hormigones hidráulicos atendiendo a su resistencia a la compresión: de densidad normal hasta 25 MPa de resistencia y de alta densidad de 30 MPa en adelante. La **Tabla 1.1** “Tipos de resistencia para hormigón de densidad normal y alta densidad” resume estas resistencias(2014).

Tabla 1.1 Tipos de resistencia para hormigón de densidad normal y alta

Tipo de Resistencia	f'_{ck} (MPa)
H 10	10
H 15	15
H 20	20
H 25	25
H 30	30

Capítulo I: Fundamentación del comportamiento de la corrosión de acero de refuerzo, en el hormigón armado

H 35	35
H 40	40
H 45	45
H 50	50
H 55	55
H 60	60
H 65	65
H 70	70

La resistencia a la 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(2014).

Betancourt(Betancourt, 2013), argumenta que la relación entre la resistencia del hormigón y la relación agua/cemento se puede formular atendiendo a la expresión esbozada por Bolomey: $f'_{c_{28}} = K(C/a - 0,5)$ (1)

Donde K es un factor que toma en cuenta la calidad del cemento y las características de los áridos.

De otra parte la (2014) “Hormigón Hidráulico- Especificaciones” y la (2001b) “Guía para la durabilidad del hormigón”, argumentan que el uso de materiales de calidad y una correcta dosificación de la mezcla, no aseguran que el hormigón resultante sea durable. Para el logro de un hormigón durable es fundamental disponer de un sistema de control de calidad y mano de obra calificada, así como aplicar procedimientos adecuados de ejecución del hormigón, considerando los requerimientos para el transporte, vertido, compactación, curado, terminación de la superficie y cualquier otro tratamiento posterior que tenga que experimentar el hormigón.

Capítulo I: Fundamentación del comportamiento de la corrosión de acero de refuerzo, en el hormigón armado

El hormigón hidráulico está constituido principalmente por áridos o agregados y la pasta de cemento endurecida. Este material anisótropo es conformado por una mezcla de áridos, cemento y agua para lograr su hidratación y que facilite la laborabilidad en su estadio inicial. Además, exige la incorporación de aditivos y/o adiciones que modifiquen sus propiedades en su estado fresco y endurecido, según el diseño y requerimientos, tanto en plantas como en obras.

1.2 Cemento Portland Ordinario (CPO). Generalidades

El cemento Portland es un conglomerante o cemento hidráulico que cuando se mezcla con áridos, agua y fibras de acero discontinuas y discretas tiene la propiedad de conformar una masa pétreas resistente y duradera denominada hormigón. Es el más usual en la construcción y es utilizado como aglomerante para la preparación del hormigón. Como cemento hidráulico tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, al reaccionar químicamente con ella para formar un material de buenas propiedades aglutinantes. El clínker se fabrica a temperatura elevada (1450 °C) en un horno al que se le introduce una mezcla molida y homogénea de minerales de origen natural (compuesta mayoritariamente por caliza y arcilla), que se transforma en nuevos minerales que presentan propiedades hidráulicas (Aguado Crespo, 1990), (Becker, n.d). El Cemento Portland Ordinario (CPO) es uno de los materiales que más se producen a nivel mundial (más de 2500 millones de toneladas) (Worrel, 2009). El proceso de obtención del cemento Portland se encuentra montado sobre la base de la explotación intensiva de recursos no renovables (materias primas y combustibles), y se emiten a través del mismo significativos volúmenes de gases de efecto invernadero, sobre todo en los procesos asociados a la producción de clínker, el principal componente del CPO (Martirena, 2003). A pesar de su relativamente bajo consumo energético por tonelada de material en comparación con otros materiales de construcción, sus altos volúmenes de producción lo hacen responsable de cerca del 7% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera y del 5% del consumo de energía en el sector industrial (Humphreys, 2002). Todo esto acentúa el fenómeno conocido como efecto invernadero, que reduce la emisión de calor al espacio y provoca un mayor calentamiento del planeta (Mena Mederos, 2012). Para solucionar los problemas medioambientales asociados a la producción de CPO la industria del cemento ha

definido como medidas fundamentales mejorar la eficiencia energética, el uso de desechos como combustibles fósiles y la reducción de la relación clínquer / cemento en el aglomerante(Castillo, 2010). Pero como la demanda de cemento es cada vez mayor y las materias primas necesarias comienzan a escasear se hace preciso la implementación de cementos con altos niveles de sustitución de clínquer(Martirena, 2014), esta sustitución se ejecutará sobre la base de los materiales cementicios suplementarios (MCS).

1.2.1 Fabricación, composición e hidratación del cemento Portland

Las cuatro fases mayoritarias del cemento son: el silicato tricálcico o alita (C_3S), el silicato bicálcico o belita (C_2S), el aluminato tricálcico (C_3A) y el ferrito aluminato tetracálcico o celita (C_4AF). La composición mineralógica del clínquer es fundamental debido a la influencia que tiene en las propiedades del material endurecido y su resistencia(Monteagudo, 2014).

Cuando el CPO es mezclado con agua, comienza la hidratación de los silicatos y los aluminatos dando lugar a un endurecimiento y rigidización de la masa que se conoce con el nombre de cemento endurecido. La hidratación se produce mediante una reacción con el agua y una hidrólisis(Cánovas, 2002).

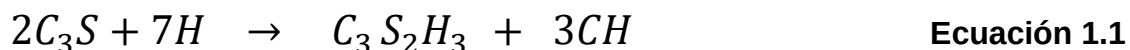
Desde un punto de vista químico, las reacciones de hidratación son un complejo proceso de disolución-precipitación en el que se disuelven los componentes más solubles del cemento anhidro, formando una fase acuosa iónica a partir de la cual y, en función del grado de saturación de dichos iones, precipitarán los hidratos correspondientes en forma de coloides o hidratos cristalinos(Heche, 2011).

Las reacciones químicas de hidratación que tienen lugar cuando los componentes del cemento entran en contacto con el agua están reflejadas en las **Ecuaciones 1.1 - 1.4**. Los compuestos mayoritarios son el gel de tobermorita (CSH) y la portlandita (CH), además aparecen otros compuestos como la etringita (fases AFt), monosulfoaluminatos (fases AFm) y otros compuestos hidratados(Morejón, 2015).

El C_3S constituye el componente principal del clínquer, formando alrededor del 50 % de este, tiene la propiedad de aportar las mayores resistencias iniciales al cemento.

Capítulo I: Fundamentación del comportamiento de la corrosión de acero de refuerzo, en el hormigón armado

El calor de hidratación que libera es muy elevado (120 cal/g), y la formación de sus productos de hidratación se reflejan en la ecuación 1.1



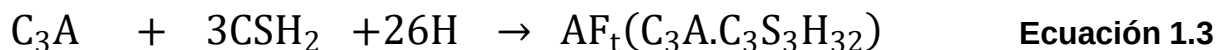
(Alita) (Agua) (Silicato de calcio (Portlandita)
hidratado)

El C_2S aporta pocas resistencias a edades tempranas pero va alcanzando resistencias progresivamente hasta alcanzar al C_3S . Ocupa alrededor del 25 % del cemento, su calor de hidratación es bajo 60 cal/g y reacciona según se muestra a continuación (Ecuación 1.2), resultando gel de tobermorita (CSH) y portlandita (CH) como productos de hidratación.

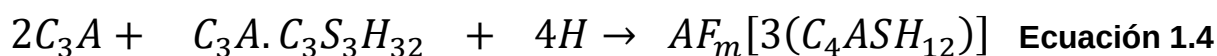


(Belita) (Agua) (Silicato de calcio (Portlandita)
hidratado)

El C_3A por sí solo no contribuye a la resistencia, pero en presencia de silicatos desarrolla resistencias iniciales buenas. Actúa como catalizador de la reacción de los silicatos. Su hidratación es muy rápida desarrollando un calor de hidratación de 207 cal/g, su contenido está alrededor del 10 %. Para retrasar su actividad se emplea yeso que actúa como regulador de fraguado. Uno de los inconvenientes, es que provoca hormigones y morteros muy sensibles al ataque de sulfatos y otros agentes agresivos. Reacciona según las siguientes ecuaciones y se obtienen la etringita (fase AFt) y el monosulfoaluminatos de calcio hidratado (fases del tipo AFm), (Ecuación 1.3 y Ecuación 1.4).



(Aluminato (Sulfato (Agua) (Etringita)
tricálcico) de calcio)



(Aluminato (Etringita) (Agua) (Monosulfoaluminato de calcio)
tricálcico)

Capítulo I: Fundamentación del comportamiento de la corrosión de acero de refuerzo, en el hormigón armado

El C_4AF apenas contribuye a las resistencias del cemento, su hidratación es rápida pero más lenta que la del aluminato y posee un calor de hidratación de 100 cal/g. Es el fundente en el horno y el responsable del color gris verdoso del cemento. Su contenido en el cemento está alrededor del 8%. Numerosos tipos de fases AFm pueden ocurrir cuando los iones que estas contienen son liberados a la solución de poros de la pasta hidratada, y son clasificados en dependencia del anión que contienen.

Todas las ecuaciones de reacción planteadas anteriormente han sido idealizadas, pues la composición variable de los productos de hidratación, y su tendencia a modificar su constitución en dependencia de la solución de poros, impiden asignarles una estequiometría fija. Es importante resaltar también el carácter exotérmico de estas reacciones y, por tanto, la directa relación que existe entre la hidratación del CPO y el calor de hidratación(Alujas, 2010).

La fabricación para los cementos más comúnmente usados. Su proceso de fabricación obedece al desarrollo de varias etapas(Martínez and Hurtado, 2014):

a) Extracción, preparación y trituración de las materias primas

Las materias primas deben triturarse al menor tamaño para obtener una mejor homogenización en la mezcla de las mismas, aspecto definitivo para que después se produzca una reacción química completa.

b) Dosificación y homogenización de las materias primas

La dosificación depende de la composición química de las materias primas, para lo cual es necesario efectuar continuamente análisis químicos que permitan dosificar con la mayor exactitud. Para realizar la mezcla, homogenización y conducción al horno se distinguen tres métodos: por vía húmeda, vía semiseca y vía seca. El método utilizado marca la diferencia entre las fábricas de este producto y la selección de uno u otro depende de las condiciones en que se encuentre la materia prima en estado natural y de las condiciones climáticas de la zona, por la repercusión en los costos del producto. Además el método determina la longitud del horno, requiriendo mayor longitud cuanto más húmeda ingrese la mezcla.

c) Cocción (obtención del clínquer)

Capítulo I: Fundamentación del comportamiento de la corrosión de acero de refuerzo, en el hormigón armado

Después de la homogenización, la mezcla pasa al horno rotatorio, que tiene una ligera inclinación con respecto a la horizontal para facilitar el avance del material en el horno cuando este gira sobre su eje. En el extremo opuesto al de ingreso de la mezcla se encuentra el sistema para calentamiento, con quemadores que trabajan con combustible como petróleo, gas o carbón pulverizado. La temperatura alcanzada es de 1450 °C, requerida para producir una fusión incipiente de la mezcla, que provoca la formación del clínquer en forma de esferas de diámetro entre 3 y 30 mm.

Los cambios que suceden en el horno son: inicialmente el secado de la mezcla si contiene agua, después de la liberación del CO₂ ocurren una serie de reacciones químicas hasta llegar a la fusión del 20 a 30% de la mezcla, combinándose así la cal, la sílice y la alúmina; y finalmente el enfriamiento del material.

d) Molienda del clínquer

Durante esta etapa se agrega yeso hidratado para controlar la velocidad de hidratación de los aluminatos, y regular así el tiempo de fraguado. En la actualidad, con el fin de disminuir los costos y mejorar ciertas características, adicionan al clínquer durante la molienda otras sustancias, que pueden ser: caliza, escoria o puzolanas. Para concluir se realiza el empaque del cemento en sacos o se almacena en silos para distribuirlo a granel.

1.3 Materiales cementicios suplementarios (MCS)

Los MCS son adiciones silicoaluminosas que se presentan en forma amorfa o pobremente cristalina, que molidas finamente, en presencia de humedad y a temperatura ambiente, reaccionan químicamente con el CH liberado durante la hidratación de los silicatos, para formar compuestos con propiedades cementantes. Cuanto mayor sea el contenido de sílice amorfa y menor la proporción de impurezas cristalinas, más reactiva resultará la adición. Este tipo de adiciones reciben también el nombre de puzolanas o materiales puzolánicos (Baronio and Binda, 1997).

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

Capítulo I: Fundamentación del comportamiento de la corrosión de acero de refuerzo, en el hormigón armado

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 Pórtland, 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(González, 2014).

Las puzolanas artificiales más utilizadas son las cenizas volantes (*flyash*), la escoria de alto horno y la micro sílice (*silica fume*), pero su alta demanda y su limitada disponibilidad se han visto reflejadas en el incremento de los precios en el mercado. Es por eso que los países subdesarrollos productores de cemento, han tenido que desarrollar otras soluciones para no verse obligados a importar los productos anteriormente mencionados.

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. 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(2011c),(2011c) ,(2011c).

Por otro lado, ante la disponibilidad de yacimientos arcillosos en diversas áreas geográficas del territorio nacional, la utilización de las arcillas calcinadas como fuente de MCS es una alternativa viable para Cuba, dado que estas constituyen la materia prima necesaria para la fabricación del CPO. Las arcillas, de comprobadas propiedades puzolánicas, una vez calcinadas bajo condiciones específicas, representan, por su amplia disponibilidad y relativa facilidad de tratamiento, una

Capítulo I: Fundamentación del comportamiento de la corrosión de acero de refuerzo, en el hormigón armado

atractiva fuente de puzolanas en regiones donde otros recursos no están disponibles(Castillo, 2010). Sin embargo, las arcillas, se encuentran con frecuencia bajo la forma de yacimientos en los que la fracción arcillosa está constituida por la mezcla de varias fases minerales, sin un claro predominio de ninguna de ellas. Por tanto el conocimiento y aprovechamiento de las materias primas, con variadas características estructurales, químicas y mineralógicas, garantiza una fuente de materiales puzolánicos(Souza and Molin, 2005).

Entre los materiales suplementarios empleados en la sustitución del clínquer se encuentran las arcillas calcinadas y el carbonato de calcio que son materiales que abundan en todo el mundo(Schneider, 2011).

Al sustituir el clínquer del cemento por arcilla calcinada existen mejoras en propiedades como resistencia mecánica de los morteros, refina la micro estructura de los poros y aumenta la durabilidad(Rossen, 2011).

Las arcillas en su estado natural no pueden ser usadas como puzolanas ya que presentan estructuras cristalinas estables que impiden la liberación de sílice y alúmina como especies químicas capaces de participar en la reacción puzolánica(Shi and Day, 2001), por lo que deben ser sometidas a un proceso de activación que puede hacerse a través de medios mecánicos, químicos o térmicos, dentro de los cuales la activación térmica es la forma más efectiva y empleada para modificar la estructura cristalina de las arcillas.

La activación de las arcillas como material puzolánico se produce a partir de la remoción de los OH^- estructurales, la ruptura de los enlaces químicos y la desestabilización resultante de la estructura cristalina. La pérdida de los OH^- desestabiliza eléctricamente la estructura. Es por eso que en las arcillas calcinadas las fases de alúmina juegan un papel muy importante en la reactividad puzolánica, pues son estas zonas de la estructura las primeras en desestabilizarse durante el proceso de desoxhidrilación. La desestabilización de cargas eléctricas y la ruptura de los enlaces químicos por el calentamiento provocan el colapso parcial de la estructura(Alujas, 2010).

Dentro de los materiales empleados como filler se encuentra la piedra caliza, la cual se usa ampliamente como material extensor del clínquer. La caliza, al ser molida conjuntamente con el clínquer que es más resistente, puede alcanzar valores muy altos de finura, lo cual acelera la hidratación de las fases de alita y alúmina, además de que suple las discontinuidades en la granulometría del clínquer al actuar como material de relleno entre sus granos. Químicamente, al reaccionar con la alúmina, forma los monocarboaluminatos, lo cual los hace competir con el yeso añadido para completar la formulación final del cemento mezclado (Menéndez et al., 2006).

El carbonato de calcio presente en la piedra caliza triturada tiene un doble papel durante los procesos de hidratación, una parte reacciona sinérgicamente con las fases aluminicas de las arcillas calcinadas, dando lugar a la obtención de fases que estabilizan la fase ettringita, propiciando con ello un incremento del volumen total de productos de reacción, el decrecimiento de la porosidad y por tanto el aumento de la resistencia. La otra parte de la caliza actúa como filler inerte, proporciona superficie específica adicional para la precipitación de los productos de reacción, favoreciendo con ello las resistencias iniciales (Muller, 2005).

1.3.1 Cemento con adiciones minerales. Cemento de bajo carbono (LC³)

El cemento de bajo carbono (LC³) es una nueva formulación propuesta en el Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras y los Materiales de Construcción (CIDEM) y en colaboración con un grupo de investigadores de la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL), en Suiza. Este nuevo aglomerante es un cemento ternario, con un considerable potencial ahorro de emisiones de CO₂ (hasta 50%), al mismo tiempo que muestra propiedades similares al cemento Portland. Esto se logra mediante la sustitución parcial del clínquer por una combinación sinérgica de arcilla calcinada y piedra caliza, esta calcinación ocurre a temperaturas más bajas que la requerida para la obtención del clínquer lo que conlleva a ahorros de combustible. La novedad y el potencial del LC³ residen en el efecto sinérgico de arcillas calcinadas y piedra caliza en términos de resistencia a las proporciones de mezcla específicas (Alujas, 2010), (Castillo, 2010), (Martirena, 2003).

La adición de metacaolín reduce la degradación por sulfatos en los morteros, teniendo presente que el óptimo reemplazo está entre el 10 y 15% en peso (Courard,

2003),(Sabir B.B., 2001). La presencia de este influye de forma significativa en la estructura de poros en morteros, produciendo un importante refinamiento de los mismos, de aquí las transformaciones que ocurren en las propiedades de transporte de agua y en los niveles de difusión de iones agresivos hacia el interior del material. El efecto de empaquetamiento ocurre en los primeros momentos de la hidratación, producto del acomodamiento de las partículas finas que no reaccionan en los espacios libres entre los granos de cemento Portland, a medida que aumenta la reacción de hidratación, aparecen las condiciones para que ocurra la reacción puzolánica. Los productos de la reacción puzolánica ocupan los espacios creados por los poros capilares, cuyo diámetro se reduce considerablemente. La proporción de poros de gel aumenta, mientras que los capilares disminuyen. Se considera que esta es la causa de la disminución de la permeabilidad en los hormigones y morteros fabricados con MCS, que se reporta en algunos casos de hasta en tres órdenes de magnitud en relación a pastas idénticas fabricadas con cemento Portland con la misma relación agua/aglomerante(Dopico and Martirena, 2008).

A partir del año 2010 fue llevado a cabo un trabajo en conjunto con la Industria Cementera Cubana para el desarrollo y aplicación del LC³, el cual levantó grandes expectativas, principalmente en la industria del cemento y el sector de la construcción ya que gran parte de estos cementos están constituidos por MCS que pueden ser puzolanas que se encuentran en abundancia en nuestra naturaleza lo cual resulta una opción bastante económica y viable. El cemento ecológico resulta de gran utilidad en aplicaciones que no lleven refuerzo, es decir, en la producción de bloques de hormigón, tejas de techo, y en general en todos los trabajos de terminación, además de ser muy útil a la industria petrolera por sus propiedades refractarias(Martirena, 2014).

1.4 Durabilidad de las estructuras de hormigón

La durabilidad es la aptitud de una dada estructura para desempeñar su función prevista (mantener la resistencia requerida y su funcionalidad) durante la vida útil especificada o tradicionalmente esperable, en sus condiciones específicas de exposición ambiental.

Capítulo I: Fundamentación del comportamiento de la corrosión de acero de refuerzo, en el hormigón armado

Se plantea que los costos de reparación y sustitución de estructuras se ha convertido en una parte sustancial del presupuesto total de la construcción, se estima que en los países industrialmente desarrollados alrededor del 40% de los recursos totales de la industria de la construcción se están aplicando a la reparación y el mantenimiento de las estructuras existentes, y sólo el 60% a las nuevas instalaciones. Existe una estrecha relación entre la durabilidad de los materiales y la ecología. La conservación de recursos naturales hace que se prolonguen los materiales de la construcción y por consiguiente un paso ecológico(Mehta and Monteiro, 2006).

Durante la vida útil de las estructuras, estas se someten a diferentes procesos de deterioro, pueden ser de naturaleza física, como la abrasión, el efecto de los sismos, las deformaciones impuestas, o de origen químico como el ataque de sulfatos y ácidos, la reacción álcali agregado, la corrosión del acero de refuerzo en dependencia de la naturaleza del hormigón y del contexto que la rodea. Adicionalmente debe sumarse la existencia de prácticas de construcción inadecuadas tales como: recubrimientos insuficientes del acero de refuerzo, relación a/c elevada, deficiente compactación, escaso curado, uso de agua y agregados contaminados con cloruros, sulfatos y otros elementos agresivos(González, 2014).

Cuando la pasta de cemento está expuesta a la atmósfera, comienza a deteriorarse, lo cual es una forma de corrosión química. La pasta reacciona a la exposición con la lluvia ácida o en la cantidad normal de dióxido de carbono en el aire. Esta reacción causa que las superficies se descascaren y carbonaten, y luego, el silicato de calcio se hidrate para dar la resistencia al hormigón que lo convertirá otra vez a carbonato de calcio, gel de sílice, y gel de aluminio. Dentro de los agentes que más afectan la durabilidad del hormigón se encuentran la humedad, los ciclos de temperatura, sales descongelantes, el ambiente marino, el dióxido de carbono y contaminantes ácidos (NO_2 y SO_2). Estos factores desencadenan procesos destructivos asociados a los minerales hidratados del cemento, que proveen la resistencia y la durabilidad(Taylor et al., 2002).

1.5 Corrosión del acero de refuerzo. Fenómeno en el hormigón

El hormigón reforzado con varillas de acero es uno de los materiales de construcción más consumido en todo el mundo, sin embargo presentan el inconveniente de ser

susceptibles a fallar por corrosión. El problema de la degradación de las estructuras de hormigón 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 muchas partes del mundo.

A pesar de los grandes avances tecnológicos mundiales, el problema de la corrosión sigue sin ser entendido completamente, debido principalmente a la complejidad del proceso de corrosión en sí mismo.

1.5.1 Causas y mecanismo de corrosión

La integridad de una estructura de concreto armado depende tanto de la calidad de sus componentes como de su dosificación, para lograr las mejores propiedades que garanticen un periodo de vida útil prolongado. La barrera de protección que le proporciona el hormigón a la varilla de acero es reforzada por el valor de pH alcalino que se alcanza después de las reacciones de hidratación del cemento, que pasivan al elemento metálico y lo protegen químicamente. Sin embargo, la interacción con el medio ambiente provoca que la protección se vea disminuida. Los principales agentes agresivos son los cloruros en regiones marinas y la carbonatación en zonas rurales e industriales. La combinación de los agentes agresivos tiene un efecto sinérgico, acelerando el proceso de degradación de las estructuras del hormigón armado(2001a).

Cuando los agentes agresivos no están presentes desde la elaboración del concreto, éstos penetran a través de él cuando la estructura es puesta en servicio. Al llegar a la superficie del metal, provocan que la corrosión se desencadene. Una vez que la corrosión se ha desencadenado, ésta se manifestará bajo tres vertientes(Cyted, 1997):

- 1) Sobre el acero, con una disminución de su diámetro inicial y por lo tanto de su capacidad mecánica.
- 2) Sobre el concreto, debido a que al generarse acumulación de óxidos expansivos en la interfase acero-concreto, provoca fisuras y desprendimientos.
- 3) Sobre la adherencia acero/concreto.

Desde el punto de vista de la corrosión del acero en el concreto (Tuutti, 1982), (Lea, 1971), definió un modelo muy sencillo que representa el tiempo que tarda una estructura de concreto proporcionando servicios para los cuales ha sido diseñada. Este modelo se divide en dos períodos.

Período de iniciación: Tiempo en que tarda el agente agresivo en atravesar el recubrimiento, alcanzar el acero y provocar el rompimiento de la capa de óxido protector.

Período de propagación: Comprende la acumulación progresiva del deterioro, hasta que alcanza un nivel inaceptable.

Estos períodos se ilustran en la Figura 1.1. (2001a)

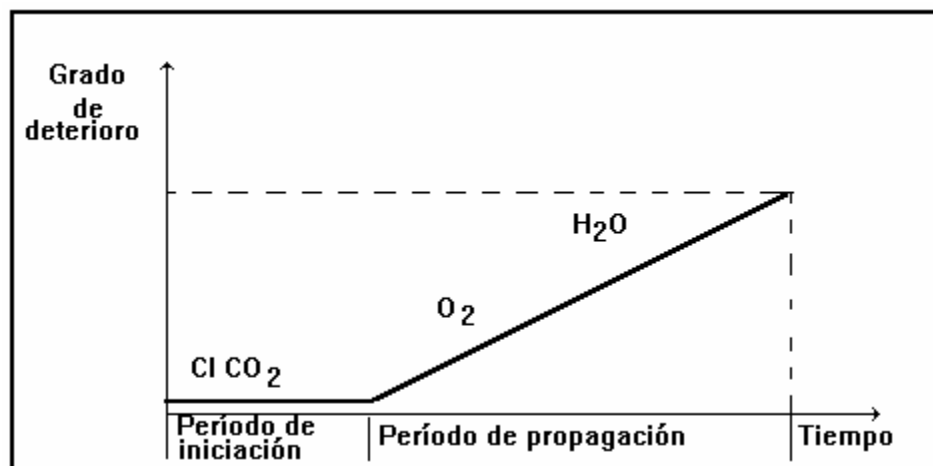


Figura 1.1 Tiempo de vida útil de una Estructura.

Durante el período de iniciación los agentes agresivos llegan a la superficie del metal e inician el proceso de corrosión. Los agentes más comunes son los iones cloruro y la neutralización de la pasta de concreto conocida como carbonatación (2001a).

1.5.2 Carbonatación

El pH del concreto puede cambiar por el ingreso de diversas sustancias desde el medio ambiente. Estas sustancias son principalmente el CO₂ que se encuentra de manera natural en el aire y el SO₃ que se produce de la combustión de combustibles fósiles. De estos, el CO₂ en el aire es de mayor importancia, de ahí el nombre de carbonatación.

A la profundidad que el CO₂ ha penetrado y por lo tanto que ha modificado el pH, generalmente se le llama "frente de carbonatación"(2001a).

En la práctica es útil conocer a qué velocidad progresa el "frente de carbonatación" para estimar si ha alcanzado la interfase acero-hormigón y poder aproximar el estado superficial que guarda la varilla metálica. La penetración del CO₂ está determinada por la forma de la estructura de los poros y por el volumen de ellos que está ocupando por la disolución poro del concreto, ya que la velocidad de difusión del CO₂ en agua es 10⁴ veces más lenta que la velocidad de difusión del 10² en el aire. En la Figura 2, se muestra el proceso químico de la carbonatación(2001a).

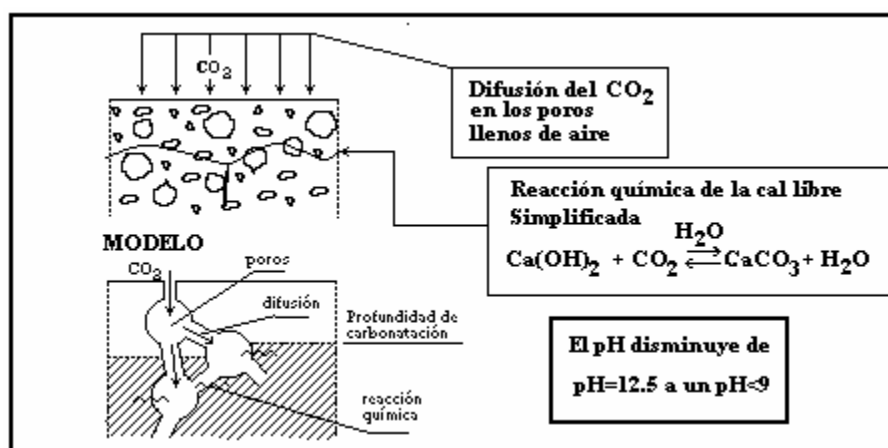


Figura 1.2 Proceso de carbonatación.

La carbonatación se presenta comúnmente en medios rurales y con mayor incidencia en zonas urbanas, en las que se alcanzan grandes concentraciones de óxidos sulfurosos (SO_x) y nitrosos (NO_x), que son combinados con el agua de la humedad ambiental formando los respectivos ácidos sulfurosos y nitrosos. En zonas de alta contaminación ambiental y altas precipitaciones pluviales, el pH llega a tomar valores cercanos a 4, lo que se conoce como lluvia ácida, que afecta las estructuras de concreto de la misma forma que la carbonatación(2001a).

1.5.3 Cloruros

La corrosión inducida por cloruro se presenta en nuestro país en estructuras expuestas al medio marino. Los iones cloruro están presentes en el agua de mar, pero es posible que también los desplace el viento de la brisa marina a la zona costera

y los deposita en estructuras de concreto cercanas a la línea de mar. Otra fuente de cloruros es en el agua de amasado, lo cual aumenta el alto riesgo de corrosión.

De acuerdo al modelo de vida útil, también es necesario que los iones cloruro avancen desde el exterior hasta llegar al nivel de la varilla. Una vez que llegan al acero, se acumulan hasta alcanzar una concentración crítica, la cual tiene la capacidad de romper la estabilidad de la película pasiva y dar inicio al proceso de corrosión(2001a).

Los iones cloruro pueden estar presentes en el hormigón de tres maneras: enlazados, adsorbidos y disueltos en el agua que se conserva en los poros, lo que constituye la disolución de poro. La Figura 1.3 ilustra los tres casos, e indica los equilibrios que se establecen para los cloruros en el hormigón.

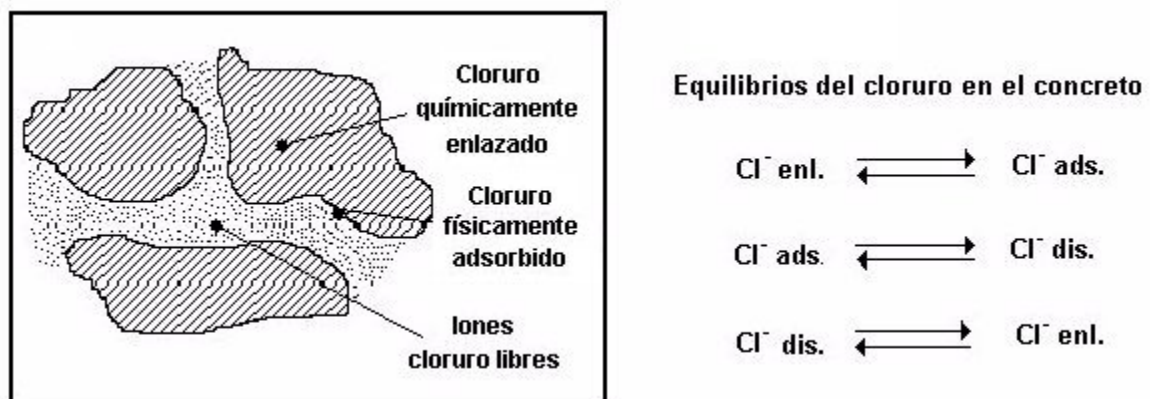


Figura 1.3 Equilibrio de iones cloruro en el hormigón.

Los iones cloruro, que son dañinos para el acero de refuerzo, son los que se hallan disueltos o libres, pero debido a los equilibrios que se presentan es posible que los que están adsorbidos se incorporen a la disolución y se tornen peligrosos.

Cuando se utiliza agua de amasado con cloruros, cierta cantidad reacciona con los compuestos hidratados del hormigón para formar las sales de Friedel, otra cantidad se adsorbe en la superficie de las paredes de los poros y sólo una parte queda disuelta. Esta distribución depende del tipo y la cantidad de cemento con que se dosifique al hormigón.

En el caso de una fuente externa de iones cloruro, el acceso es a través de los poros del hormigón. Al avanzar al interior una cantidad reacciona, otra se adsorbe y otra

Capítulo I: Fundamentación del comportamiento de la corrosión de acero de refuerzo, en el hormigón armado

fracción queda disuelta. El medio de exposición es determinante para el ingreso de los iones cloruro. En una estructura sumergida en agua de mar, el mecanismo lo determina la diferencia de concentración entre el exterior y el interior del hormigón, es decir, se favorece un proceso difusivo. En obras que se hallan a la intemperie, durante el día, por efecto de la humedad relativa del ambiente, se evapora una cierta cantidad de agua contenida en los poros, quedando parcialmente llenos. Si la brisa marina deposita sal sobre su área superficial, el ingreso del ion es por succión capilar, o sea cuando que la humedad relativa permite la formación de una película superficial de agua (punto de rocío) que es succionada por los poros capilares para llenarse nuevamente. En la succión, la sal que se depositó durante el día es arrastrada por el agua condensada y penetra al interior del hormigón. Una combinación de las dos formas de ingreso de cloruro se observa en la zona de variación de marea, en la que los poros eliminan agua durante marea baja y se saturan en marea alta(2001a).

Las divergencias en las cantidades máximas de cloruros admitidas por los distintos códigos aparecen debido a la inexistencia de un límite único de aplicación general. Ello se produce tanto por las diferencias de características de los cementos (su contenido en álcalis y velocidad de hidratación), como por los distintos tipos de acero utilizados (composición química, rugosidad superficial y estado de conservación), así como por las distintas materias potencialmente suministradoras de los cloruros.

En relación a este límite máximo de cloruros es importante mencionar que parte de ellos se puede combinar con las fases alumínicas y ferríticas de los cementos, por lo que los más peligrosos son los que quedan sin combinar o “libres”. La proporción cloruros entre libres y cloruros combinados no es constante, ya que está influida por la finura del cemento, su contenido en yeso, la temperatura durante el fraguado y la humedad de los poros del hormigón.

En cuanto a los cloruros que penetran desde el exterior es necesario diferenciar el caso de ambientes marinos de aquellos donde se hace uso de las sales de deshielo, ya que sus proporciones relativas en el exterior del hormigón pueden ser muy diferentes. Así, mientras el agua o ambiente marino contiene una cierta proporción constante de cloruros, en el caso de las sales de deshielo, su proporción exterior será

proporcional a la cantidad de sales que se emplean al año debido a la frecuencia y duración de las heladas (Publicación Técnica No. 182 Sanfandila, Qro, 2001).

Los deterioros del hormigón como grietas, desconchados, fracturas y la corrosión del propio hormigón son causa de los gradientes de temperatura, el calor de hidratación del cemento, la reacción álcalis-agregado, el hielo y deshielo en los países fríos y la deficiente ejecución en la fabricación de los elementos estructurales. Esto a su vez provoca la penetración de agentes agresivos que atacan tanto al hormigón como al acero de refuerzo, el aumento de la humedad en el interior del material y la vulnerabilidad a la intemperie. Se conoce que la principal causa de deterioro en hormigón es la corrosión del acero de refuerzo, siendo la transportación o penetración de iones cloruros el principal catalizador de este proceso.

En(Abbas, 2015), se enuncia que los cloruros existen en diferentes formas en el hormigón, enlazados y libres. El cloruro libre está en la forma iónica en la solución de los poros y puede difundirse al acero a través de los poros, siendo estos los que intervienen directamente en el proceso de corrosión.

Cuando el ion cloruro reacciona con las fases de aluminato forma un compuesto relativamente insoluble conocido sal de Friedel, esta es levemente expansiva, pero no provoca tensiones grandes que deterioren al hormigón, también frena temporalmente los iones cloruros, reduciendo su movilidad para alcanzar a las armaduras y romper su condición pasiva(Montaña and Carmona, 2015).

1.6 Mecanismos de transporte de iones cloruros en el hormigón

Los iones cloruros y otras sustancias agresivas penetran a través del hormigón por diferentes mecanismos de vía, dependiendo de la fuerza que acciona. La permeabilidad, difusión y absorción (capacidad de absorción) son los mecanismos de transporte de cloruros más conocidos. El estado de humedad del hormigón y el entorno de servicio determinan la fuerza de conducción y por lo tanto los mecanismos por los que el cloruro penetra en el hormigón(Bioubakhsh, 2011).

La **Tabla 1.2** muestra los mecanismos de transporte de iones a través del hormigón, las fuerzas conductoras y la vía que utilizan durante el transporte, (Böhni & Hans, 2005) tomado de(León and Oróstegui, 2009).

Tipos de mecanismos	Fuerza conductora	Poros
Permeabilidad (gases y líquidos)	Diferencia de presión absoluta	Llenos con aire o agua
Difusión (gases e iones)	Gradiente de concentración Diferencia de presión parcial	Llenos con aire o agua
Absorción (líquidos)	Tensión de superficie Ángulo de contacto	Llenos con aire

Tabla 1.2 Mecanismo de transporte de iones en el hormigón.

1.6.1 Permeabilidad

La permeabilidad del hormigón es la capacidad y facilidad del material de permitir el paso de líquidos, gases y otras sustancias al interior del mismo. Dicha propiedad es gobernada mayormente por la permeabilidad del mortero y la pasta de cemento endurecida, es definitiva donde se encuentran los poros permeables capaces de permitir el paso de sustancias, mediante distintos fenómenos (Betancourt, 2013).

Por lo general las mismas propiedades que convierten al hormigón menos permeable, también lo vuelven más hermético y durable. La permeabilidad total del hormigón está en función de la permeabilidad de la pasta y de la permeabilidad y granulometría de los áridos. Varios factores pueden afectar la permeabilidad del hormigón, como:

- Diseño y proporcionamiento de las mezclas de hormigón
- Tipo y contenido de cemento utilizado
- Relación agua cemento (a/c)
- Régimen de curado del hormigón
- Edad y resistencia del hormigón
- Contenido de humedad y temperatura

Por ejemplo en el tipo de cemento, para una misma relación agua cemento (a/c), el cemento grueso produce una pasta más porosa que un cemento fino. La composición del cemento perjudica la permeabilidad, demostrándolo en su influencia sobre la rapidez de hidratación, pero el grado final de porosidad y de permeabilidad no se afecta (Montaña and Carmona, 2015).

Capítulo I: Fundamentación del comportamiento de la corrosión de acero de refuerzo, en el hormigón armado

Las partículas de los agregados o áridos influyen en la microestructura de la pasta de cemento en la zona de transición en la interface árido-cemento. Comúnmente esta zona presenta mayor porosidad y menor contenido de cemento sin hidratar, en comparación con la pasta suelta. El tipo y tamaño de los áridos puede afectar el volumen y la porosidad de la zona de transición en la interface cemento-árido y por lo tanto pueden influir en las propiedades de permeabilidad del hormigón(Bioubakhsh, 2011).

La compactación tiene un valor importante dentro de las múltiples variables que influyen en la resistencia y durabilidad del hormigón. La porosidad del hormigón y la continuidad entre sus poros depende de una correcta compactación, las cuales afecta las características de permeabilidad del hormigón.

Uno de los problemas que presentan las construcciones de hormigón destinadas al almacenamiento de gases, cámaras de vacío, edificios nucleares, conductos para el transporte de fluidos, etc., es el de que, al no ser el hormigón un material estable, aumenta su permeabilidad con el paso del tiempo, independientemente que la resistencia del hormigón aumente con el tiempo(Muñoz, 1988).

1.6.2 Absorción

La succión capilar se produce en el hormigón seco o seco parcialmente, cuando está en contacto con agua (los iones disueltos), debido a la tensión superficial en los capilares(Bertolini, 2004). De forma tal que la capacidad de absorción está influenciada por los poros capilares y su grado de continuidad. Es muy sensible a la hidratación de la superficie externa del hormigón y por consiguiente del curado ya que el hormigón se mantiene semisaturado. La capacidad de absorción depende también de la compactación de la mezcla, orientación y distribución de los áridos y de la composición de la mezcla(González, 2011).

La succión capilar puede propiciar el fenómeno de transporte en estado estacionario, si las condiciones de límite son mantenidas convenientemente en un tiempo constante. El agua asciende producto de la succión capilar en un elemento de hormigón en contacto con ella, mientras la evaporación del agua en el lado opuesto está en equilibrio con la toma superior de agua, la succión capilar transporta el agua

encima de una cierta sección del miembro de hormigón en un proceso estacionario(2009).

1.6.3 Difusión del cloruro en el hormigón

La difusión es el mecanismo de transporte principal de cloruros en el hormigón, al estar saturado como en condiciones sumergidas, ya que se producen gradientes de concentración. La transportación de una solución puede ocurrir por diferencias de concentración entre dos zonas adyacentes, por ejemplo, en una zona del hormigón la concentración es mayor que en otra; tratando de lograr un equilibrio entre ellas se genera un movimiento desde la zona más concentrada hacia la zona menos concentrada. Este proceso se conoce como "difusivo" y es muy lento; el ingreso de CO₂ desde la atmósfera, provocando la carbonatación del hormigón es un ejemplo de este proceso(Montaña and Carmona, 2015).

León y Oróstegui(León and Oróstegui, 2009), plantean que en condiciones de estado no estacionario, este proceso se describe matemáticamente con la segunda ley de Fick de difusión, se ajusta a un alto grado a la realidad práctica del hormigón, y para un flujo dimensional está dada por: $\frac{dC}{dt} = D \left(\frac{d^2C}{dx^2} \right)$ **Ecuación 1.5**

Donde D es el coeficiente de difusión (m²/s) y C es la concentración de cloruros disueltos en la solución de poros (mol/m³ de solución de poros).

A través del coeficiente de difusión se relaciona la concentración de iones cloruros en el espacio y en el tiempo, donde varios modelos tradicionales se apoyan en la segunda ley de Fick. Este coeficiente se precisa como la tasa de transferencia de una especie iónica a través de una sección de área por el gradiente de concentración(González, 2014).

Estos autores, (León and Oróstegui, 2009), enuncian en el método de laboratorio NT BUILD 443 que el coeficiente de difusión aparente no es un parámetro del material, pero debe ser considerado como un coeficiente de regresión que cuantifica la permeabilidad de un hormigón específico bajo condiciones ambientales establecidas, es una medida de la permeabilidad (porosidad, la distribución y conectividad de los poros) del hormigón con respecto a los cloruros en el tiempo de experimentación bajo condiciones de saturación, se reduce con el tiempo debido a la hidratación, aumenta

Capítulo I: Fundamentación del comportamiento de la corrosión de acero de refuerzo, en el hormigón armado

con respecto a la temperatura de forma exponencial, tiene en cuenta la velocidad de ingreso y en consecuencia la caída en el coeficiente de difusión en varios ordenes de magnitud para bajos grados de saturación de agua en el hormigón.

Existen varios factores que influyen en la difusión del cloruro en el hormigón que pueden ser la porosidad, dada a la relación agua – cemento, el tipo de cemento, el régimen de curado y la compactación, ya que el transporte de iones es a través de los poros; el tiempo, ya que a mayor tiempo existirá mayor concentración del ion en la superficie y la saturación del hormigón que posibilita los gradientes de concentración del ion.

La porosidad es un término que describe el volumen de poros en el sistema y la conectividad caracteriza cómo estos poros están conectados a través del sistema tridimensional, estos dos parámetros microestructurales influyen en la resistividad del material. Comúnmente el inverso del producto de estos dos parámetros es denominado factor formación, esta relación se muestra en la siguiente ecuación:

$$\phi \times \beta = \frac{1}{F}$$

Ecuación 1.6

Donde ϕ es la porosidad del material, β es la conectividad de los poros y F el factor formación.

Efectos del ion cloruro sobre la difusión

El aluminato tricálcico (C_3A) y ferrito aluminato tetracálcico (C_4AF) son las dos fases en el cemento responsables de la unión química del cloruro. Estas dos fases constituyen las de sales cloro férricas y de Friedel mencionada anteriormente. El grado de unión depende de la cantidad de aluminato y las fases de ferrito aluminato tetracálcico presentes en el cemento. En la mezcla los cloruros son adsorbidos por el gel de hidrato (CSH) de silicato de calcio amorfo, que depende del volumen de los productos de hidratación, en particular de la cantidad de (CSH) producido. La presencia de cloruros en el hormigón se ve afectada por muchos factores, como el tipo de cemento, tipo y proporción del material de sustitución de cemento, la relación a/ c, tiempo de curado, temperatura, concentración de cloruro y así sucesivamente(2011c).

1.7 Influencia del ambiente marino en el comportamiento del hormigón hidráulico

Dada las condiciones geográficas de la isla de Cuba, la durabilidad de las estructuras de hormigón armado se ve afectada por la penetración de iones cloruros, dada su cercanía a la costa, lo que influye en la corrosión del acero de refuerzo, que provoca la pérdida de sus propiedades originales y aumento del volumen, causándole grietas al hormigón que lo protege, quedando el acero vulnerable a cualquier ataque de la intemperie, de cloruros o de la carbonatación.

El hormigón expuesto a un ambiente marino se deteriora por los efectos combinados de la acción química de los constituyentes del agua de mar sobre los productos de hidratación del cemento, de la expansión álcali-árido (cuando hay áridos reactivos), de la presión de cristalización de sales en el hormigón si una cara de la estructura está sometida a condiciones de humedad y la otra a condiciones de secado, a la acción del hielo en climas fríos, a la corrosión de las armaduras y a la erosión física debida a la acción de las olas y de las partículas en suspensión. Cada una de estas acciones provoca un aumento de la permeabilidad del hormigón, lo que contribuye a que progrese el ataque de la causa inicial y el de los demás tipos de acción. En ambientes que contienen cloruros, tales como los ambientes marinos (el agua de mar presenta como media 3,5% de concentración de sales minerales) o donde se utiliza sales descongelantes, la velocidad de corrosión del acero en el hormigón puede aumentar(Ahlström, 2015).

1.8 Técnicas de medición del ingreso del ion cloruro en el hormigón

Son múltiples la cantidad de ensayos y estudios que se desarrollan en el tema de la explicación y caracterización de los fenómenos y procesos que intervienen en los mecanismos de transporte de iones cloruros a través del hormigón hidráulico, ya que es una de las principales causas que desencadena la corrosión del acero de refuerzo. Existen los métodos de evaluación in situ de cloruros, destructivos y no destructivos como se muestra en la **Figura 1.4** “Métodos y técnicas para medir la concentración de ion cloruro en el hormigón”, también existen los métodos de laboratorio, siendo los ensayos de migración de cloruros por potencial eléctrico uno de los más empleados,

ya que permite obtener resultados de la penetración de iones cloruros a través de especímenes de hormigón en períodos de tiempo corto (Abbas, 2015).

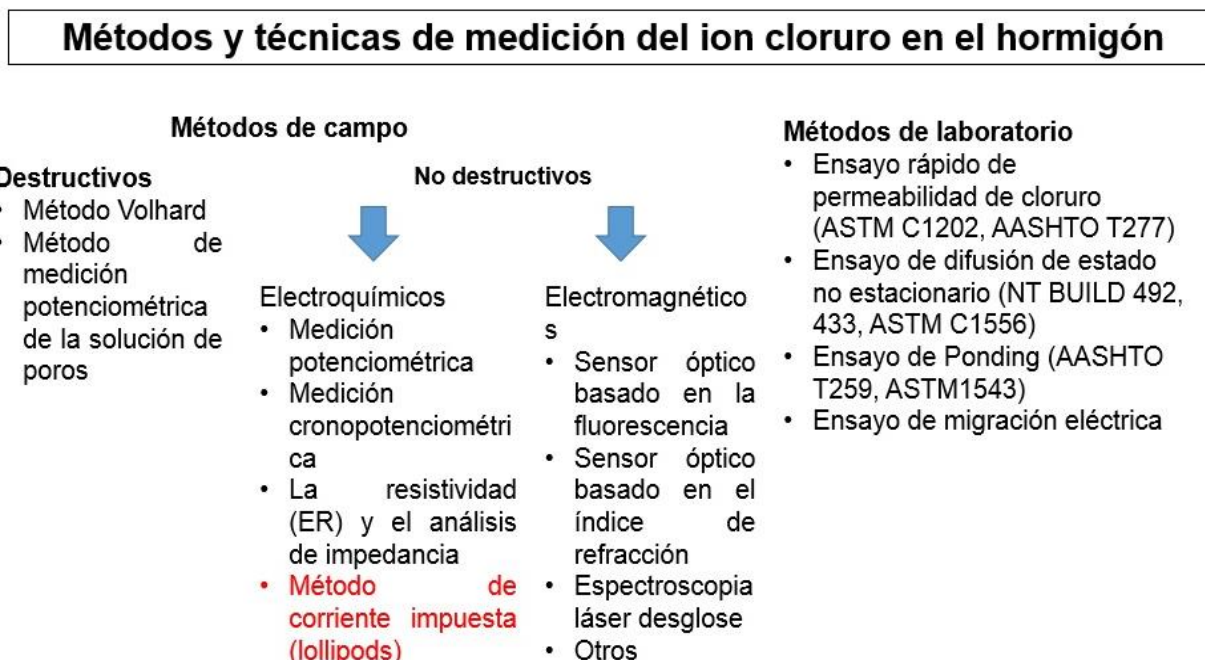


Figura 1.4 Métodos y técnicas para medir la concentración de ion cloruro en el hormigón.

1.8.1 Técnicas destructivas para la evaluación in situ de cloruros

El método de Volhard y el método potenciométrico son métodos destructivos para la determinación de iones cloruros, ya que requieren de la extracción de la solución de poros del hormigón, en estos pueden resultar significativos los errores de medición, con resultados por debajo o por encima de lo estimado. Esto puede llevar a una decisión equivocada en el mantenimiento, también causan costos indirectos adicionales debido a los cierres de la vía y las demoras en el tránsito, en caso de que se trate del estudio de los elementos de un puente. Estas técnicas son usadas principalmente para decisiones a corto plazo con respecto al mantenimiento y actualización del modelo (2015).

1.8.2 Métodos no destructivos para la evaluación in situ del cloruro

En las últimas dos décadas son diversos los estudios y los avances que se han alcanzado en las técnicas no destructivas de medición in situ de la penetración de iones cloruros en el hormigón, obteniendo resultados de la concentración del cloruro. Dentro del campo de aplicación de las técnicas de medición no destructivas in situ, se utilizan dos técnicas fundamentales las electroquímicas y las electromagnéticas.

Capítulo I: Fundamentación del comportamiento de la corrosión de acero de refuerzo, en el hormigón armado

- Técnicas electromagnéticas

Las técnicas electromagnéticas basan su estudio en los campos eléctricos y magnéticos (sensores, espectroscopía, resonancia magnética) con un gran desarrollo de sus instrumentos para medir índices y concentraciones dentro de las muestras de hormigón que a simple vista sería imposible determinar.

- Técnicas electroquímicas

La corrosión es definida como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, la salinidad del fluido en contacto con el metal y las propiedades de los metales en cuestión. En estas técnicas entra el método de estudio que por su característica no destructiva facilita su empleo ya que las muestras que se utilizan en estos ensayos pueden ser reutilizadas para posteriores estudios.

Método de corriente impuesta (lollipop)

Este método de corriente impuesta, su aplicación es nueva dentro del estudio de la medición ion cloruro en nuestro país. Gracias a estos métodos tanto potencioestáticos (la perturbación de potencial aplicada es una función escalón) como galvanostáticos (en este caso es la intensidad de corriente aplicada) podemos ser capaces de determinar parámetros tan importantes como la velocidad de corrosión, potencial de protección, resistencia de polarización, potencial de ruptura. Aplicando el método, se puede estudiar el comportamiento frente a la corrosión localizada de un material cementicio y se puede obtener información de cómo de resistente es un material de interés tecnológico, como es el acero de refuerzo, frente a un determinado medio agresivo. Del mismo modo, se puede observar si dicha resistencia frente a la corrosión mejora generando recubrimientos en ese mismo material o variando el pH de la solución en la que se sumerge dicho espécimen.

1.8.3 Ensayo de migración de cloruros en el hormigón

En estos métodos de migración, se introducen artificialmente iones adicionales en la solución de poros, por la aplicación de un potencial eléctrico adecuado entre la fuente de iones y el hormigón. Los iones preferidos son los iones cloruro. Un campo eléctrico

Capítulo I: Fundamentación del comportamiento de la corrosión de acero de refuerzo, en el hormigón armado

puede en gran medida acelerar el movimiento de iones a través del hormigón sin cambiar en lo fundamental el proceso de difusión. Esta aceleración es llamada migración y está gobernada por los mismos parámetros básicos de difusión: la movilidad iónica o difusividad. Whiting en 1981 fue el primer investigador en aplicar un campo eléctrico para acelerar el ensayo de penetración de cloruros en el hormigón y propuso el ensayo de permeabilidad rápida de cloruro, que ha sido estandarizado por la norma ASTM C1202 y por el Organismo Regulador de las Obras Viales en los Estados Unidos (González, 2011).

El término migración es usualmente empleado para el flujo iónico generado por una diferencia en el potencial eléctrico. Dependiendo de la variación de la concentración en el tiempo, estos ensayos se suelen dividir en dos tipos: estacionarios y no estacionarios. En estos ensayos conocidos como ensayos de migración, la muestra es saturada y sometida a una diferencia de potencial constante. Aunque desde hace años se proponen diversos tipos de montajes en general, desde hace un par de décadas se puede reconocer que el montaje recurrente para el propósito de determinar el coeficiente de difusión, es colocar una probeta de concreto o mortero de sección circular de 100 mm de diámetro y de 50 mm de espesor, entre dos celdas en las que en la primera existe una solución de cloruros y en la otra una solución con concentración de elementos como sodio, potasio e hidróxidos. La diferencia de potencial hace que se presente el flujo iónico desde la celda con la solución de cloruros hasta la otra celda, a través del espécimen de hormigón. La duración del ensayo depende del espesor de la probeta. De igual forma la cantidad de diferencia de potencial aplicado es una variable que está vinculada a la propiedad de la muestra de resistirse al flujo de los iones (González, 2014).

1.9 Conclusiones parciales del Capítulo I

- La durabilidad del hormigón hidráulico en ambientes agresivos es afectado principalmente por la corrosión del acero de refuerzo, que a su vez es causa fundamental de los mecanismos de transporte del ion cloruro: permeabilidad, difusión o absorción.
- Los métodos de campo, tanto destructivos como no destructivos, emplean iones cloruros en las soluciones empleadas para obtener el coeficiente de difusión de una forma rápida mediante la aplicación de un potencial eléctrico que varía entre 10 y 60V.
- El ensayo electroquímico de corriente impuesta ofrece resultados útiles para evaluar la durabilidad de hormigones hidráulicos, tomando en cuenta la penetración de iones cloruros. Se puede estudiar el comportamiento frente a la corrosión localizada de un material cementicio y se puede obtener información acerca de la resistencia de un material de interés tecnológico frente a un determinado medio agresivo.

Capítulo II: Desarrollo de la metodología a aplicar en el método de corriente impresa para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo

CAPÍTULO II: DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA A APLICAR EN EL MÉTODO DE CORRIENTE IMPUESTA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

En este capítulo se expone el protocolo experimental a utilizar para determinar la corrosión del acero expuesto a un voltaje, en un ambiente salino. Para el cumplimiento de este objetivo se describen las características de los materiales a utilizar, el protocolo de diseño del método, además de los equipos e instrumentos empleados en el laboratorio.

Para lograr este objetivo se realizan probetas de hormigones con cementos: Portland P-35 y cemento de bajo carbono LC³, en el laboratorio de construcción de la Facultad de Construcciones de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, respectivamente, donde se preparan los especímenes para ser evaluados en un ensayo de ataque de cloruros en la fisuración de hormigones.

2.1 Diseño experimental de mezclas de hormigón para especímenes

Para comenzar con la producción de hormigones se realiza un diseño experimental para evaluar la influencia del tipo de cemento, la relación a/c, el contenido de cemento en la composición química de los hormigones producidos con LC³-50 y P-35, para su posterior evaluación corrosiva, luego, se procede a lo siguiente:

1. Preparación de cemento LC³-50 mezclando LC² (Yaguajay), con P-35 (Cienfuegos) en proporción 50% / 50% (peso).
2. Preparación de las series de hormigón, todas con dosificaciones de 35 MPa de CSM (árido no optimizado): (i) referencia con P-35 (Cienfuegos); (ii) sustituyendo P-35 en 1=1 por LC³-50 producido con cemento LC² Yaguajay (50% peso) y P-35 Cienfuegos (50% peso). Se producirán dos réplicas por cada serie.

2.2 Caracterización de los materiales constituyentes del hormigón

2.2.1 Cementos

Se emplearon dos tipos de cementos el Cemento Portland P-35 de la fábrica de cemento Carlos Marx, de Cienfuegos y el cemento de bajo carbono LC³ producido en el laboratorio de construcción de la Facultad de Construcciones de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, a partir de la fusión en proporción 1:1 de LC²

Capítulo II: Desarrollo de la metodología a aplicar en el método de corriente impresa para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo producido con la arcilla de Yaguajay y con P-35, los datos del análisis químico del LC² realizados en el laboratorio se muestran en la **Tabla 2.1** “Análisis químico del cemento LC²”.

Tabla 2.1 Análisis químico del cemento LC².

Compuesto químico	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	RI	PPI	CaO libre
%	27,3	4,58	4,58	49,80	1,30	3,65	12,59	7,11	0,90

Los aglomerantes empleados se caracterizaron según los ensayos estandarizados en la (2011a) “Cemento con adición activa. Especificaciones” para evaluar su conformidad. En la **Tabla 2.2** se muestran los requisitos que tienen que cumplir los diferentes grados de cementos con adiciones activas, así como los métodos de ensayo a emplear.

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

Índice	Requisitos	UM	P-35	Método de ensayo
Físicos	Superficie Específica Blaine (mín.)	cm ² /g	2800	NC EN 196-6
	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	

El producto se aceptará si los resultados de ensayo cumplen con los requisitos establecidos en la **Tabla 2.3** de la(2011b).

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

ENSAYOS MECÁNICOS			OBSERVACIONES
Ensayo	Resultados	Según NC 96:2011	

Capítulo II: Desarrollo de la metodología a aplicar en el método de corriente impresa para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo

Resistencia a compresión (MPa)	3 días	7días	28 días	3 días	7días	28 días	El producto cumple con las especificaciones de la noma con respecto a ensayos mecánicos.
Resistencia a compresión (MPa)	23,5	31,6	46,2	17	25	35	
ENSAYOS FÍSICOS							OBSERVACIONES
Ensayo			Resultados	Según NC			
Superficie Específica (cm2/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			
Pérdida por ignición (máx.) %			3,67	4,0			El producto cumple con las especificaciones de la noma con respecto a ensayos químicos.
Residuo insoluble (máx.) %			5,79	4,0			
Trióxido de Azufre (máx.) %			0,72	3,5			

Las características del cemento cumplen con los requisitos de las diferentes normas empleadas.

2.2.2 Áridos

Los áridos utilizados son procedentes de la cantera Mariano Pérez (El Purio), para la caracterización físico-mecánica de estos, la misma cantera en conjunto con la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Villa Clara realizaron los ensayos pertinentes teniendo en cuenta las normas cubanas para áridos: (2013)“Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos”, la (2002c) “Áridos-Análisis granulométrico”, la (2002b) “Áridos-Determinación del contenido de partículas de arcilla-Método de ensayo”, la (2002a) “Árido grueso-Peso específico y absorción de agua-Método de ensayo” y la (2002d) “Áridos-Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (No. 200)-Método de ensayo”. Se utilizaron tres tipos de materiales en clasificación de: arena (4.76 – 0.147mm), polvo de piedra (9.50 – 4.76mm) y gravilla (19.0 – 9.50mm). En las **Tablas 2.4 y 2.5** se encuentran los resultados de laboratorio de estos áridos por clasificación

Capítulo II: Desarrollo de la metodología a aplicar en el método de corriente impresa para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo

Tabla 2.4 Características físico-mecánicas de los áridos finos.

Ensayos	Arena 4,76 - 0.147mm	Polvo de piedra 9,50 – 4,76mm
Material más Fino que 0.074 mm (%)	4,3	5,3
Partículas de Arcillas (%)		
Partículas Planas y Alargadas (%)		
Impurezas Orgánicas		
Pesos Específicos Corriente	2,40	2,39
Pesos Específicos Saturado	2,48	2,46
Pesos Específicos Aparente	2,61	26
Absorción (%)	3,33	3,03
Masa Volumétrica Suelta (kg/m ³)	1430,104	1401,910
Masa Volumétrica Compactada (kg/m ³)	1614,854	1577,251
Porcentaje de Huecos (%)	32,71	34,01
Módulo de Finura	3,42	

Tabla 2.5 Características físico-mecánicas del árido grueso

Ensayos	Gravilla 19,0 – 9,50mm
Material más Fino que 0,074 mm (%)	2,4
Partículas de Arcillas (%)	
Partículas Planas y Alargadas (%)	
Impurezas Orgánicas	
Pesos Específicos Corriente	2,44

Capítulo II: Desarrollo de la metodología a aplicar en el método de corriente impresa para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo

Pesos Específicos Saturado	2,51
Pesos Específicos Aparente	2,6
Absorción (%)	2,53
Masa Volumétrica Suelta (kg/m ³)	1452,801
Masa Volumétrica Compactada (kg/m ³)	1579,927
Porcentaje de Huecos (%)	35,25
Módulo de Finura	

2.2.2.1 Granulometría de los áridos

Los resultados del proceso granulométrico estipulado por la (2002c) se muestran en la **Tabla 2.6** “Granulometría de los áridos”.

Tabla 2.6 Granulometría de los áridos.

No. Tamiz	% Pasado		
	Gravilla	Polvo de piedra	Arena
25.5mm	100	-	-
19.0mm	95	-	-
12.5mm	53	100	-
9.50mm	30	98	100
4.75mm	11	46	99
2.36mm	-	18	67
1.18mm	-	11	48
600 µm	-	-	28
300 µm	-	-	13
150 µm	-	-	4
74 µm	-	-	-

2.2.3 Aditivo

Se empleó un aditivo superplastificante, Dynamon SX32, este aditivo es producido a base de polímeros acrílicos no sulfonados, exento de formaldehído y sin modificar la

Capítulo II: Desarrollo de la metodología a aplicar en el método de corriente impresa para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo

consistencia, permite reducir fuertemente el contenido en agua de un hormigón, o que, sin modificar el contenido en agua, aumenta considerablemente el asiento, o ambos efectos a la vez, proporcionándole una adecuada permeabilidad y una alta resistencia mecánica. Es suministrado por la empresa italiana (MAIPE) Materiales Auxiliares para la Construcción y la Industria, los datos técnicos que ofrece el fabricante se muestran en la **Tabla 2.7** “Características del aditivo Dynamon SX32”. Su dosificación según la (2014) para el empleo del aditivo en volumen puede variar entre 0.5 y 1.5 litros por cada 100 kg de cemento.



Figura 2.1 Aditivo Superplastificante Dynamon SX32.

Tabla 2.7 “Característica del aditivo Dynamon SX-32”

Composición química	Base de polímeros acrílicos no sulfonados
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

Capítulo II: Desarrollo de la metodología a aplicar en el método de corriente impresa para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo

2.2.4 Agua de amasado

El agua potable que se empleó fue regulada por la (2004) “Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones”. En ella se define que se considera apta para el amasado y curado de los hormigones el agua fresca potable, proveniente de acueductos y de otras fuentes de abastecimiento, cuya utilización esté adecuadamente avalada por resultados prácticos, con materiales análogos y uso semejante.

2.3 Acero negro

Se emplea acero negro de barras corrugadas de 12mm de diámetro y cortadas a 100mm de longitud (2010a)

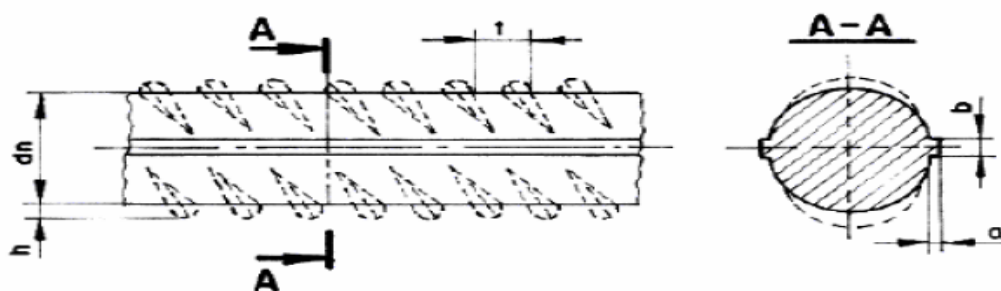


Figura 2.2 Barra corrugada (corruga helicoidal parcial).

Según la (2010a) se especifican los parámetros y dimensiones del acero, que se muestran en la **Tabla 2.8**.

Tabla 2.8 Parámetros y dimensiones principales del acero.

No. Designación de la barra	Dimensiones Nominales			Requisitos Nominales de la Corruga y Nervio (mm)							
	Diámetro		Área de la sección circular	Espaciamento promedio		Altura Min promedio	Altura del nervio		Grueso del nervio		Max separación
	mm	(pulg)	mm ²	Min	Max		Min	Max	Min	Max	
13(4)	12,7	1/2	129	6,3	8,9	0,7	0,63	1,77	1,01	2,03	4,9

Capítulo II: Desarrollo de la metodología a aplicar en el método de corriente impresa para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo

2.3.1 Acabado del acero

Para el empleo del acero como refuerzo del hormigón es necesario que la superficie no presente escamas, rajaduras, burbujas, desgarraduras u otros defecto que afecten los requisitos de la norma(2010a).

El acero fue producido en barras comerciales de 9 metros que fueron cortadas en partes de 100 mm para luego de su limpieza ser soldadas con alambre de cobre de 150 mm de longitud y ser ubicados en los moldes cilíndricos de 100 x 200 mm. Para mejorar las condiciones del acero, este se preparó dado que estaban oxidado y consistió en:

1. Colocación del acero dentro de un recipiente de vidrio (hermético) con líquido desoxidante (oxide) y para que desprendiese la herrumbre, manteniéndose por 2 días semi destapado.
2. Pasados los dos días se eliminó toda la capa restante de óxido con un cepillo de alambre para pulir y dejar completamente limpia toda la superficie.
3. Se enjuagó en agua por un corto período de tiempo para eliminar la capa de óxido que pueda haber quedado.
4. Colocación del acero en alcohol isopropílico con un 99,9 % de pureza para eliminar el agua del paso anterior.
5. Se ensamblan por soldadura la barra de acero y el alambre de cobre, en un corto periodo de tiempo para evitar que el acero se corroa.
6. Colocación de las barras de acero en un recipiente de vidrio (hermético) para mantenerlo bajo condiciones de ambientales estables, evitando que se desencadene nuevamente el proceso corrosivo, hasta su colocación dentro de las probetas.
7. Se pesan cada una de las barras.



Figura 2.3 Preparación, limpieza y conservación del acero.

2.4 Fabricación del hormigón

2.4.1 Dosificación de las mezclas de hormigón empleadas

Las dosificaciones para estos hormigones responden a una resistencia de diseño de 35 y 50 MPa, con la colocación de aditivo Dynamon SX32 (MAPEI) para lograr un asentamiento en planta y en obra de 12 ± 3 cm por el Cono de Abrams, según la (2014) “Hormigón hidráulico. Especificaciones” como consistencia fluida.

Tabla 2.9 Dosificación gravimétrica kg/m³ de hormigón con P-35 y LC³-50

<u>Muestra</u>	<u>NC</u> <u>120:2014</u>	<u>f'c</u>	<u>Relación</u> <u>a/c</u>	<u>Cemento</u>	<u>Aditivo</u>	<u>0-5mm</u>	<u>5-10mm</u>	<u>10-20mm</u>	<u>Agua</u>
				<u>Kg</u>	<u>Kg</u>	<u>Kg</u>	<u>Kg</u>	<u>Kg</u>	<u>Kg</u>
H1	Muy Alta	35	0,4	430	3,87 (P-35) 8,6 (LC ³ -50)	634	352	775	172

Capítulo II: Desarrollo de la metodología a aplicar en el método de corriente impresa para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo

2.4.2 Moldes empleados

Para la evaluación de los especímenes se emplearon moldes cilíndricos de 100 x 200 mm, los cuales se limpian y se engrasan para ser llenados posteriormente.



Figura 2.4 Moldes cilíndricos de 100x200mm.

2.4.3 Llenado de probetas, compactación y conservación

La referencia tomada fue la (NC 221, 2002) "Hormigón. Elaboración de probetas para ensayos". Previamente antes del llenado de las probetas, se impregnan las paredes y fondo de los moldes metálicos para facilitar el posterior desencofrado. Una vez mezclado todos los materiales en la hormigonera, se introduce el hormigón en los moldes, en 3 capas de llenado las cuales se compactan hasta que aflore la pasta de mortero, luego se engrasa la superficie de las probetas para evitar rugosidades.

Las probetas se conservan durante 24 horas en los moldes. Pasado ese tiempo se desencofran los moldes y se marcan las probetas de forma que no se alteren las superficies. Posteriormente las probetas se transportan a la piscina de curado, donde se almacenan hasta la realización de los ensayos.



Figura 2.5 Llenado de las probetas.



Figura 2.6 Desencofrado y curado.

2.5. Protocolo de corriente impuesta. Metodología aplicada

En este epígrafe se describen los métodos y el procedimiento empleados en el experimento de corrosión del acero por el protocolo de corriente impuesta (lollipods).

El protocolo de corriente impuesta cuenta con cuatro métodos de experimentos:

- Cloruros, preparar una muestra simuladora de poro al 3,5% de NaCl (con H₂O, KOH, NaOH y Ca(OH)₂) para sumergir las muestras y llegar a una completa corrosión.
- Circuito de corriente, aplicar entre 15 y 20 volt a cada uno de los especímenes por separado y en los recipientes que contengan la solución simuladora de poros.
- Nitrato de plata, para medir la profundidad de penetración de iones cloruros en cada muestra.
- Corrosión en el acero, versión de la norma ASTM G1 para medir cuanto se corroe el acero dentro del hormigón, basado en las perdidas de masa una vez transcurrido el tiempo de ensayo.

En la **Figura 2.7** se ilustra el modelo del método de corriente impuesta (lollipods) que reflejan los dos primeros métodos del protocolo de aplicación.

Capítulo II: Desarrollo de la metodología a aplicar en el método de corriente impresa para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo

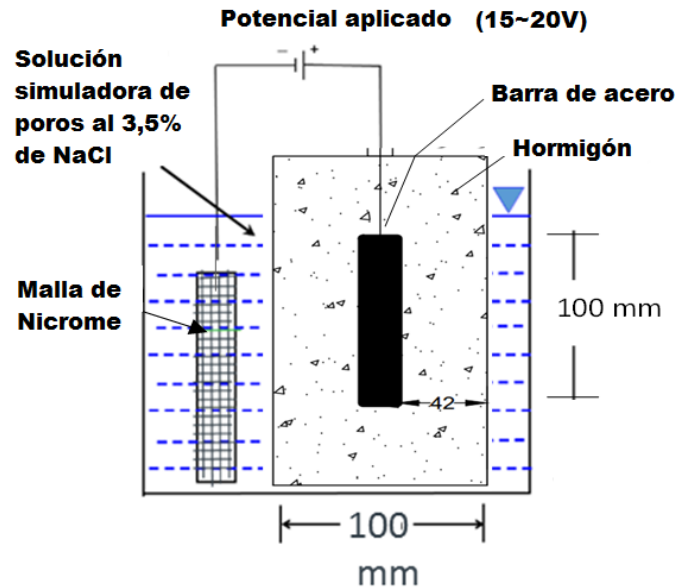


Figura 2.7 Esquema de prueba del método de corriente impresa.

2.5.1 Materiales, instrumentos y equipos empleados en el método de corriente impresa

- *Materiales y reactivos:*
 - Líquido desoxidante (Oxide)
 - Sellante: Adhesivo epóxico para cubrir unión de soldadura entre el alambre y el acero negro
 - Alambre de cobre dulce
 - Acero negro
 - Alcohol isopropílico al 99,9%
 - Pintura impermeable
 - Solución simuladora de poro al 3,5% de NaCl (con 966g de H₂O por litros o más (L+), 10,4g de NaOH por L+, 23,23g de KOH por L+ y 0,3g de Ca(OH)₂ por litro)
 - Alambre de Nicrom
 - Nitrato de plata (AgNO₃)
 - Agua destilada para la preparación de la soluciones
- *Instrumentos y equipos:*
 - Recipiente de vidrio (hermético)
 - Cepillo de alambre
 - Moldes de acero de 100x200 mm

Capítulo II: Desarrollo de la metodología a aplicar en el método de corriente impuesta para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo

- Hormigonera con capacidad total de
- Balanza
- Fuente para el suministro constante de voltaje de potencia 0-30V, intensidad de corriente de 0-2V.

2.5.2 Medios de protección utilizados

Es necesario el empleo de diversos medios de protección tales como gafas protectoras, guantes de goma y protectores de las vías respiratorias para evitar inhalar gases tóxicos, y llevar a cabo el proceso en un ambiente ventilado para en caso de alguna fuga, evitar accidentes.

2.6 Ensayo de corriente impuesta. Procedimiento desarrollado

2.6.1 Limpieza de acero

Los aceros de 100mm que fueron traídos del Cayo Santa María se limpian con el líquido desoxidante (oxide) y cepillo de alambre para quitar la herrumbre que estas trae, como se ilustra en la Figura 2.8.



Figura 2.8 Limpieza de aceros.

2.6.2 Aplicación de resina epóxica

Aplicar resina epóxica a la unión entre el alambre de cobre dulce y el acero para dar soporte a la soldadura. Luego se comprueba con el voltímetro que la corriente sea continua. Véase figura 2.9.



Figura 2.9 Aplicación de la resina epóxica.

2.6.3 Preparación de los especímenes

- i. Pesar las proporciones de la mezcla de hormigón (cemento P-35, agua, áridos fino y grueso, aditivo y arcilla LC²)
- ii. Mezclado de los materiales en la hormigonera de forma ordenada tal que quede una mezcla homogénea. Véase Figura 2.10



Figura 2.10 Mezclado de los materiales en la hormigonera.

- iii. Vertido de la mezcla en tres partes, en los moldes cilíndricos con el acero y el alambre dentro.
- iv. Vibrado y curado por 28 días (sumergidos en agua para acelerar el fraguado).
- v. Secar los especímenes y pesar hasta peso constante

2.6.4 Mediciones

- i. Se prepara en recipientes por separado una solución simuladora de poro al 3,5% de NaCl, que contiene 966 g H₂O por litro o más (l+), 10,4 g NaOH por litro o más (l+), 23,23 g KOH por litro o más (l+) y 0,3 g Ca(OH)₂ por litro (l).
- ii. Introducir los especímenes en dichos recipientes con la solución y aplicarle un voltaje de 15V mediante el alambre de cobre. Precaución: los recipientes deben estar sellados para evitar la carbonatación de la disolución.
- iii. Secar los especímenes y pesar hasta peso constante.
- iv. Medir por el microscopio (en caso de no ser visibles) o con una regla (en caso de estar a simple vista) las grietas producidas en el hormigón.
- v. Se cortan los 50mm de la parte inferior de la probeta que están libres de acero.
- vi. Se aplica nitrato de plata a la superficie que se encontraba dentro.
- vii. Medir la profundidad de penetración de iones cloruros en los testigos cortados.

2.6.5 Corrosión del acero

- i. Extraer el acero que se encuentra en las probetas.
- ii. Mediante la norma ASTM G1 determinar el grado de corrosión del acero expuesto a un ambiente agresivo de corriente en solución salina.

CAPÍTULO III: EVALUACIÓN DEL GRADO DE CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO DEBIDO A LA PENETRACIÓN DE IONES CLORUROS

3.1 Producción de hormigón

La fabricación de los hormigones fueron realizados en los laboratorios de materiales del CIDEM en la facultad de Construcciones de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas y para ello se utilizó una mezcladora de eje horizontal de 14 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 se agrega el cemento y se homogeniza, se le añade la cantidad de agua de amasado con una 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. Medición del asentamiento por el cono”, 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, como se muestra en la **Tabla 3.1**.

Se pretendía lograr asentamiento fijados entre 120 y 140 mm logrando consistencias entre plásticas y blandas, según la (NC 174, 2002). Fue necesario aplicarles dosis de aditivos el cual varió 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.

Tabla 3.1 Resultados de consistencia.

Tipo de hormigón	Asentamiento (mm)
P-35	120
LC ³	140



Figura 3.1 Cono de Abrams. Prueba de asentamiento.

3.2 Ensayos del hormigón endurecido

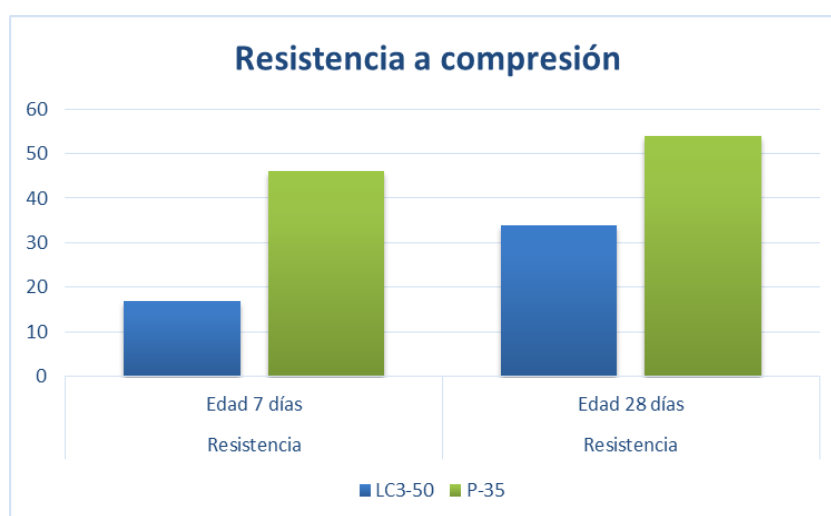
3.2.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión es de los principales ensayos que se le realizan 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 los 7 y 28 días de edad. En la **Tabla 3.2** se detallan los valores de las resistencias a compresión.

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

Tipo de hormigón	Resistencia Edad 7 días	Resistencia Edad 28 días
LC ³ -50	17	34
P-35	46	54

Gráfico 3.1 Análisis de resultados de resistencia a compresión.



3.2.2 Permeabilidad al aire

La permeabilidad del hormigón en estado endurecido, nos da la idea de la capacidad que tiene el material de permitirse que un flujo lo atraviese sin alterar su estructura interna; si 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.

Según la norma (ASTM C1202, 2010), estos hormigones presentan una permeabilidad baja (véase la Tabla 3.3), por tanto su composición, el tipo de encofrado y los procesos de colocación y curado, que se llevaron a cabo siguiendo la normativa estudiada, dieron como resultado que los dos hormigones sean de buena calidad.

Tabla 3.3 Resultados obtenidos a partir de los 7 y 28 días de edad, en el hormigón endurecido.

Permeabilidad al aire	Resultado Edad 7 Días $kT(10^{-16}m^2)$	Resultado Edad 28 Días $kT(10^{-16}m^2)$
LC ³ -50	0,0221	0,022
P-35	0,0275	0,014



Gráfico 3.2 Análisis de resultados de permeabilidad al aire.

3.2.3 Resistividad

Este es de los ensayos más importantes en este estudio, ya que este nos aporta un criterio a una posible aparición o no de la corrosión en el acero reforzado, para así determinar una correspondencia de la estructura de poros de los cementos LC³ y P-35, con la velocidad de fisuración.

A los 7 días de edad ambos hormigones muestran un elevado riesgo de corrosión y una velocidad de corrosión alta; mientras que a los 28 días el hormigón con cemento P-35 continúa con las características continua con un alto riesgo de corrosión y velocidad de corrosión alta, mientras que el hormigón producido con cemento LC³ presenta una velocidad de corrosión moderada, con un riesgo de corrosión moderado; como se muestra en la **Tabla 3.4**. Esto nos permite concluir que el hormigón producido con P-35 al ser expuesto a la corriente, se fisurea antes que el hormigón de cemento de bajo carbono.

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

Tipo de hormigón	Resistividad promedio kΩcm	Temperatura Promedio °C	Resistividad promedio kΩcm	Temperatura Promedio °C
	Edad 7 Días	Edad 7 Días	Edad 28 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 Análisis preliminar del método de corriente impuesta

En este epígrafe solo se reportarán los resultados referentes a las primeras 48 horas de ensayo, debido a problemas enfrentados durante la fase experimental.

En el **Gráfico 3.3** se muestran los resultados previos de las mediciones de corriente durante 48 horas de ensayo. Como se puede observar, los valores de corriente medidos (véase **Tabla 3.5**) durante este tiempo presentan una oscilación apreciable en las mediciones. Durante las primeras 20 horas aproximadamente se aprecian los cambios más violentos en los valores de corriente, lo cual pudiera atribuirse al proceso de sacado y posterior saturación de las muestras en la solución de poros simulada,

Capítulo III: Análisis de los resultados del transporte de iones cloruros en hormigones hidráulicos producidos con cemento de bajo carbono LC³

ya que al secar las probetas cambia la estructura de poros del hormigón y al someterlo a una solución rica en iones alcalinos se produce un movimiento violento de los iones dentro de la estructura armada. Por otra parte, a partir de las 24 horas esta variabilidad en las mediciones se hace más estable para ambos hormigones debido a la saturación de los especímenes con la disolución alcalina. Sin embargo, cuando se linealizaron los resultados para cada muestra, podemos observar que la media de las mediciones realizadas no presentan diferencias significativas entre los diferentes hormigones, lo cual no determina el grado de corrosión de los aceros de refuerzo. Por consiguiente, no es suficiente el tiempo de medición empleado para poder observar las grietas y así, la evaluación del grado de corrosión fue incompleta.

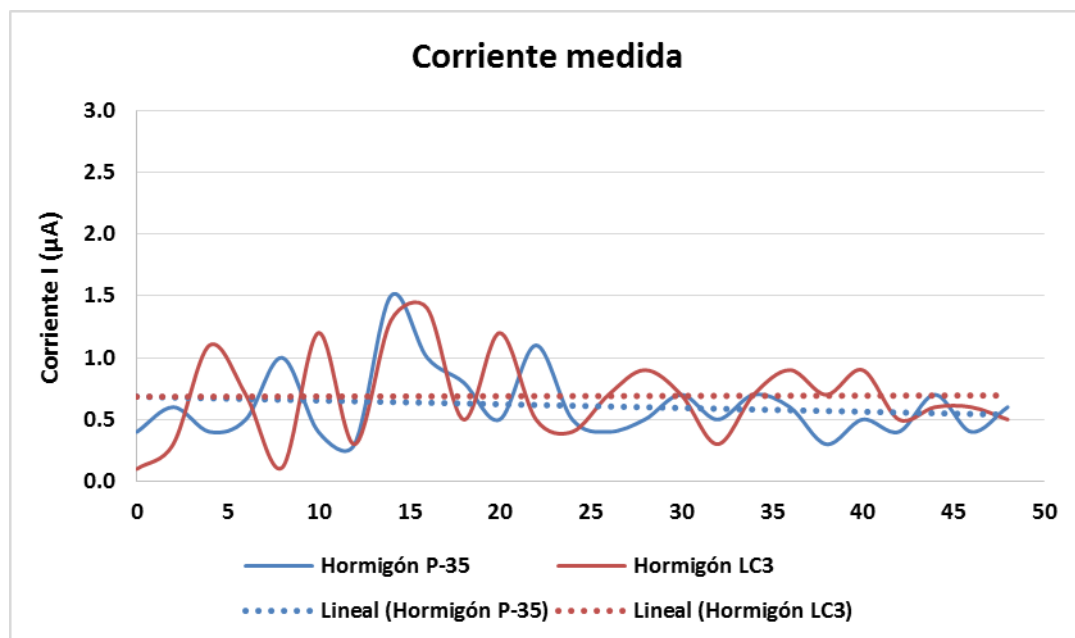


Gráfico 3.3 Resultados previos de las mediciones de corriente durante 48 horas.

CONCLUSIONES GENERALES

- La caracterización de los cementos LC² y P-35 cumplen con los requisitos establecidos en la norma NC 96:2011 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.
- Los hormigones producidos presentan una buena calidad presentando en ambos casos una adecuada resistencia mecánica a los 28 días (LC³: 34 MPa y P-35: 54 MPa) 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.
- Se logró el diseño de metodología para el método de corriente impuesta (lollipop), permitiendo la evaluación del efecto de la corrosión, debido al ataque por penetración de cloruros, en la fisuración de sistemas acero-hormigón de LC³.
- Los resultados previos del método de corriente impuesta muestran que durante las primeras 24 horas de ensayo existe una variabilidad significativa en los valores de corriente. Sin embargo, a partir de este tiempo, esta variabilidad se hace más estable para ambos hormigones debido a la saturación de los especímenes con la disolución alcalina. No obstante, el tiempo de las mediciones implementado (48 horas) no es suficiente para poder observar las grietas y por consiguiente, la evaluación del grado de corrosión fue incompleta.

RECOMENDACIONES

- Aumentar el tiempo de medición de la corriente hasta que se observen las primeras grietas y así continuar con el protocolo propuesto en este estudio para evaluar la pérdida de masa del acero, factor determinante del grado de corrosión del mismo.
- Se recomienda evaluar el método con un mayor número de réplicas y aumentando el voltaje aplicado.

BIBLIOGRAFÍA

Abbas, Y., 2015. *In-situ measurement of chloride ion concentration in concrete*, The Netherlands.: Doctoral Thesis.

ACI 201-2R.01, 2001. *Guía para la durabilidad del hormigón*, s.l.: s.n.

Aguado Crespo, F., 1990. *Introducción a la construcción*, s.l.: s.n.

Ahlström, J. L. U. a. S., 2015. *Corrosion of steel in concrete at various moisture and chloride levels*, Stockholm: The Division of Building Materials, Lund University.

Alujas, A., 2010. *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente*, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas: s.n.

Ambroise, J., Murat, M. & Pera, J., 1994. *Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals V*, s.l.: Extension of the research and general conclusions. Cement and Concrete Research [Online], 15 (2)..

ASTM C1202, 2010. *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, Estados Unidos: s.n.

Baronio, G. & Binda, L., 1997. *Study of the pozzolanicity of some bricks and clays*, s.l.: Construction and Building Materials, 11.

Becker, E. A. (., n.d. *CEMENTO PORTLAND CARACTERÍSTICAS Y RECOMENDACIONES DE USO*, s.l.: s.n.

Bertolini, L. E. B. P. P. a. P. R., 2004. *Corrosion of steel in concrete - prevention, diagnosis and repair.*, Germany: 1st edition, Wiley-VCH, Weinheim.

Betancourt, S., 2013. *Otras propiedades del hormigón endurecido*, Conferencia 6, Facultad de Construcciones, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.: Asignatura Tecnología del hormigón.

Bioubakhsh, S., 2011. *The penetration of chloride in concrete subject to wetting and drying: measurement and modelling*, UCL (University College London).: Doctoral thesis.

Cánovas, M. F., 2002. *Hormigón*, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.: s.n.

Bibliografía

Castillo, R., 2010. *Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza*, s.l.: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas..

Castillo, R., 2010. *Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza*, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas: Tesis de Doctorado.

Cement Concrete; Aggregates, 2009. Australia: s.n.

Courard, L. D. A., 2003. *"Durability of mortars modified with metakaolin. Cement and Concrete Research."*, s.l.: s.n.

Cyted, 1997. *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*, Brasil: s.n.

Dopico, J. & Martirena, J. F., 2008. *Desarrollo de hormigones con aglomerante calpuzolana fina como material cementicio suplementario*, s.l.: s.n.

González, A., 2011. *Estudio experimental de la relación entre la resistividad eléctrica del hormigón y su resistencia a la penetración de iones cloruro*, Universidad de Chile: Memoria para optar el título de ingeniero civil.

González, J., 2014. *Modelos de penetración del ion cloruro orientados a la predicción de la vida útil de las estructuras de concreto*, Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá: s.n.

Habert, G., 2009. s.l.: s.n.

Heche, C., 2011. *Análisis de la adición de nano partículas en la microestructura de materiales de base cemento*, Universidad Politécnica de Madrid: Tesis de Maestría.

Huat, 2006, Citado en Bioubakhsh, 2011. *The penetration of chloride in concrete subject to wetting and drying: measurement and modelling*, UCL: Doctoral thesis.

Humphreys, K. M. M., 2002. *Toward a Sustainable Cement Industry*, Battele: Climate Change.

Inc., S. T., 2008. *STADIUM. UNIFIED FACILITIES GUIDE SPECIFICATIONS*, Quebec, Canadá: s.n.

Bibliografía

Janotka, 2003, Citado en Bioubakhsh, 2011. *The penetration of chloride in concrete subject to wetting and drying: measurement and modelling*, UCL: Doctoral thesis.

Lea, F. M., 1971. *The chemistry of cement and concrete*, New York: Chemical Publishing Company.

León, C. & Oróstegui, S., 2009. *Determinación del coeficiente de difusión aparente del ión cloruro en concreto expuesto a ambientes con cloruros*, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga: Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Químico.

Martínez, L. C. & Hurtado, M. A., 2014. *“Estudio y caracterización del residuo de la fabricación de tuberías en acero para determinar su uso en la producción de morteros y concretos”*, Universidad de Cartagena: Tesis de diploma.

Martirena, F., 2014. *El Cemento de Bajo Carbono*, Santa Clara, Cuba: s.n.

Martirena, J. F., 2003. *Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínquer de cemento Portland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa*, Santa Clara: s.n.

Mehta, P. & Monteiro, P., 2006. *Concrete Microstructure, Properties and Materials*, Durability: Chapter 5.

Mena Mederos, K., 2012. *Evaluación de hormigones a partir del uso de nuevos aglomerantes ternarios sobre la base del sistema clínquer- arcilla calcinada-carbonato de calcio*, Cuba: s.n.

Menéndez, G., Bonavetti, V. L. & Iassar, E. F., 2006. *Ternary blended cement concrete. Part I: Early age properties and mechanical strength 56 (284).*, s.l.: s.n.

Montaña, C. & Carmona, R., 2015. *Impacto de las adiciones para concreto en la reducción de la permeabilidad al ion cloruro vs la relación agua cemento*, Bogotá: Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería.

Monteagudo, S., 2014. *Estudio microestructural y de los procesos de hidratación de cementos con adiciones*, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid: Tesis Doctoral.

Bibliografía

Morejón, L., 2015. *Morteros de cemento con adiciones de humo de sílice y nanosílice*, Universidad Politécnica de Madrid: Tesis de Maestría.

Muller, C. J., 2005. *Pozzolan activity of natural clay minerals with respect to environmental geotechnics*, SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH: Doctor of Technical Science: 159.

Muñoz, D., 1988. *Permeabilidad del hormigón al aire. Efecto de la edad del hormigón en la permeabilidad*, s.l.: Informes de la Construcción. Vol. 40, # 398..

NC 120, 2014. *Hormigón hidráulico. Especificaciones*, Cuba: s.n.

NC 174, 2002. *Hormigón fresco. Medición del asentamiento por el cono*, s.l.: s.n.

NC 178, 2002. *Áridos-Análisis granulométrico*, Cuba: s.n.

NC 179, 2002. *Áridos- Determinación del contenido de partículas de arcilla - Método de ensayo*, Cuba: s.n.

NC 182, 2002. *Áridos-Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (No. 200)-Método de ensayo*, Cuba: s.n.

NC 187, 2002. *Árido grueso-Peso específico y absorción de agua-Método de ensayo*, Cuba: s.n.

NC 221, 2002. *Hormigón. Elaboración de probetas para ensayos*, s.l.: s.n.

NC 251, 2013. *Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos*, Cuba: s.n.

NC 344, 2005. *Hormigón endurecido- Determinación del perfil de penetración de iones cloruros*, Cuba: s.n.

NC 353, 2004. *Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones*, Cuba: s.n.

NC 752, 2010. *Barras de acero soldables para refuerzos de hormigón-Especificaciones*, s.l.: s.n.

NC 95, 2011. *Cemento Portland. Especificaciones*, Cuba: s.n.

NC 96, 2011. *Cemento con adición activa. Especificaciones*, Cuba: s.n.

Bibliografía

Peraza, L., 2014. *Aplicación del protocolo STADIUM® a hormigones producidos con cemento de bajo contenido de carbono (LCC)*, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas: Trabajo de Diploma.

Publicación técnica No. 182, 2001. *El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado*, Sanfandila, Qro: Sanfandila, Qro.

Rossen, J. S. K., 2011. *"Investigation of cement substitution by combined addition of calcined clays and limestone."*, s.l.: s.n.

Sabir B.B., S. W. J. B., 2001. *Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. Cement and Concrete Composites [Online]*, 23: 441-454, s.l.: s.n.

Sánchez de Rojas, M., 2004. *Extracción electroquímica de cloruros del hormigón armado: estudio de diferentes variables que influyen en la eficiencia del tratamiento*, Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Escuela Politécnica Superior de Alicante: Tesis Doctoral.

Schneider, M., 2011. *Sustainable cement production present and future*, s.l.: Cement & Concrete Research, 41, 642-650.

Shi, C. & Day, R. L., 2001. *"Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans."*, s.l.: Cement and Concrete Research 31(5): 813-818.

Souza & Molin, D., 2005. s.l.: s.n.

Stanish, K., Hooton, R. & Thomas, M., 1997. *Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review*, Toronto, Ontario, Canadá: Department of Civil Engineering University of Toronto.

Sumranwanich; Tangtermsirikul, 2004, citado en Bioubakhsh, 2011. *The penetration of chloride in concrete subject to wetting and drying: measurement and modelling*, UCL: Doctoral thesis.

Taylor, P., Johansen, V. & Klemm, W., 2002. *Porqué la química interesa en el hormigón*, s.l.: ACI Concrete International.

Torres, 2014, citado en Abbas, 2015. *In-situ measurement of chloride ion concentration in concrete*, The Netherlands: Doctoral thesis.

Bibliografía

Toutanji, 2004, Citado en Bioubakhsh, 2011. *The penetration of chloride in concrete subject to wetting and drying: measurement and modelling*, UCL: Doctoral thesis.

Tuutti, K., 1982. *Corrosion of steel in concrete*, Stockholm: The Swedish Cement and Concrete Association.

Weerd, 2011. s.l.: s.n.

Worrel, E. a. e. a., 2009. *Energy Efficiency* 2(109), s.l.: s.n.

Zych, T., 2014. *TEST METHODS OF CONCRETE RESISTANCE TO CHLORIDE INGRESS*, Cracow University of Technology: s.n.