

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Construcciones
Departamento de Ingeniería Civil



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Investigación inicial de durabilidad para poner en marcha el ensayo de corrosión en ambiente carbonatado con especímenes de hormigón armado con áridos reciclados.

Autor: Jean Brayan Reyes Avalos

Tutor: MSc. Sandra Lichtblau

Consultante: Prof. Dr. Fernando Martirena

Santa Clara

2017

Pensamiento

*“No es el resultado de la investigación científica
que ennoblece a los seres humanos y enriquece su naturaleza,
sino la lucha por entender mientras realiza un trabajo
intelectual
creativo y de mente abierta”.*

Albert Einstein

Dedicatoria

*A mi mamá Mayelin por el sacrificio, dedicación y entrega
total, desde el momento nací.*

*A mi papá Fvelio por siempre tenerme presente y haber
constituido un digno ejemplo a seguir.*

*A mi hermano Ale que quiero ser su ejemplo y motor
impulsor en el estudio.*

A mis abuelos José y Fvelio.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a mis padres y hermanos por su dedicación, ayuda y sacrificio durante todos estos años.

A mi novia Flianis, los suegros y mis cuñadas por el apoyo brindado y el cariño recibido que me ha ayudado mucho durante todo este tiempo.

A mi tutora Sandra por la paciencia, dedicación, exigencia y ayuda durante todo este tiempo.

A mis amigos del 103 por esas noches incansable de fiesta, estudio y ayuda prestada, uno hacia los otros como hermanos que fuimos durante estos años compartidos.

A Atilin y Anika por la ayuda prestada en toda la tesis desde tamizar hasta las noches de elaboración de hormigón.

A Felipe por la ayuda prestada en todo momento.

A Yoel y todo el personal del laboratorio de materiales.

A Ana Estrella y Elizabeth por la ayuda prestada durante la tesis.

A todos mis profesores por contribuir a mi formación como profesional.

Muchas Gracias.

RESUMEN

Los residuos de construcción y demolición (RCD) significa un importante aporte al desarrollo socioeconómico con respecto al agotamiento de recursos no renovables, donde los áridos son aproximadamente del 60-75% de la mezcla de hormigón y pueden ser reutilizados. La fabricación de hormigones con áridos reciclados conlleva a un aumento en la consistencia y la absorción para una misma relación agua-cemento. Se aplicó la técnica del encapsulamiento de la fracción de 5-9mm en áridos gruesos para estudiar mejoras que tienen estos hormigones producidos con áridos reciclados. Los hormigones armados se ven afectada durante su vida por el fenómeno de la corrosión, esta reacción sufrida en las barras de acero es ocasionada por el proceso de carbonatación. Lo cual consiste en la reacción del dióxido de carbono (CO_2) en la atmosfera y el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ resultante de la hidratación de la pasta de cemento, logrando una disminución del pH, donde la barra de acero pierde su capa protectora microscópica de óxido generada por la alcalinidad del hormigón. En el presente trabajo abordaremos acerca de hormigones elaborados con áridos reciclados mediante ensayos de resistividad, permeabilidad al aire, resistencia a compresión y el método de la Macrocela, con él se evalúa en tiempo real y condiciones controladas el estudio de la corrosión en especímenes de hormigón armado con áridos reciclados y cemento P-35. El método desarrollado de la Macrocela podríamos calcular el potencial de media celda, la densidad de corriente dentro del circuito entre las barras de acero y la caída óhmica.

Palabras claves: áridos reciclados; carbonatación; corrosión; macrocela

ABSTRACT

Construction and demolition waste (RCD) is an important contribution to the socio-economic development in relation to the depletion of non-renewable resources, where aggregates are approximately 60-75% of the concrete mixture and can be reused. The manufacture of concrete with recycled aggregates leads to an increase in consistency and absorption for the same water-cement ratio. The technique of encapsulating the 5-9 mm fraction in coarse aggregates was applied to study the improvements of these concretes produced with recycled aggregates. During their lifetime, reinforced concretes are affected by the phenomenon of corrosion, this reaction happening in steel bars is caused by the carbonation process. This consists the reaction of the carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere and the calcium hydroxide Ca (OH)₂ resulting from the hydration of the cement paste, achieving a decrease of the pH-value, where the steel bar loses its layer of protective microscopic oxide generated by the alkalinity of the concrete. In the present work we will discuss concrete made from recycled aggregates by means of resistivity, air permeability, compressive strength and Macrocell tests, which evaluates the study of corrosion in reinforced concrete specimens in real time and controlled conditions, with recycled aggregates and P-35 cement. The method developed by the Macrocell could calculate the potential of half cell, the current density inside the circuit between the steel bars and the ohmic case.

ÍNDICE

Introducción	1
Capítulo I: Estado del arte sobre la corrosión del acero en hormigones con áridos reciclados. ..	5
1.1 Hormigón hidráulico con áridos reciclados encapsulados.	5
1.1.1 Materiales pétreos reciclados.	6
1.1.1.1 Clasificación de los residuos.	7
1.1.1.2 Características según su peligrosidad.	7
1.1.2 Propiedades de los áridos reciclados.	8
1.1.3 Propiedades del hormigón con áridos reciclados.	9
1.1.3.1 Propiedades en estado fresco.	9
1.1.3.2 Propiedades en estado endurecido.	10
1.2 Durabilidad del hormigón armado con áridos reciclados.	11
1.2.1 Ensayos de durabilidad.	13
1.2.2 Factores que influyen en la durabilidad del hormigón armado con áridos reciclados. ..	13
1.2.3 Resultados de la carbonatación al hormigón y el acero.	15
1.2.3.1 Factores que favorecen la corrosión.	15
1.2.3.2 Influencia del pH, temperatura y humedad relativa.	16
1.2.3.3 Determinación de la profundidad de la carbonatación.	17
1.3 Corrosión del acero de refuerzo por carbonatación.	18
1.3.1 Fenómeno de corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón con áridos reciclados.	19
1.3.1.1 Definición de procesos.	21
1.3.2 Prevención de la corrosión.	25
1.4 Métodos para evaluar el grado de corrosión.	26
1.4.1 Ensayos comunes para evaluar el grado de corrosión.	26
1.4.2 Método de la Macroelda.	28
1.4.2.1 Modelo de corrosión de Microceldas.	29
1.4.2.2 Modelo de corrosión de Macrocelas.	29
Conclusiones Parciales Capítulo I	31
Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macroelda para la evaluación de la corrosión de especímenes de hormigón armado con áridos reciclados, fabricados con cemento P-35.	32
2.1 Diseño experimental de mezclas de hormigón para especímenes de hormigón armado con áridos reciclados.	32
2.2 Caracterización de los materiales constituyentes del hormigón.	33

2.2.1 Áridos reciclados	33
2.2.2 Cemento P-35.....	39
2.2.3 Agua de amasado	40
2.2.4 Aditivo.	40
2.3 Acero	42
2.3.1 Acero inoxidable.....	42
2.3.2 Acero negro	43
2.4 Fabricación de hormigones	44
2.4.1 Dosificación de las mezclas de hormigón empleadas	44
2.4.2 Producción de hormigón	45
2.4.3 Moldes empleados	45
2.4.4 Llenado de probetas, compactación y conservación	46
2.5 Ensayos al hormigón en estado fresco.....	47
2.5.1 Docilidad.....	47
2.5.2 Consistencia	47
2.5.2.1 Cono de Abrams	47
2.6 Ensayos al hormigón en estado endurecido	48
2.6.1 Resistencia mecánica a compresión a edades de 7 y 28 días.	48
2.6.2 Resistividad a edad de 28 días.	49
2.6.2.1 Preparación de la superficie de hormigón.	50
2.6.2.2 Interpretación de los resultados.	50
2.6.2.3 Estimación de la probabilidad de corrosión.....	50
2.6.2.4 Indicación de la velocidad de corrosión.	50
2.6.3 Permeabilidad al aire a 28 días.	51
2.6.3.1 Descripción del método	51
2.6.3.2 Interpretación de los resultados	52
2.6.5 Profundidad de carbonatación.....	52
2.7 Método experimental	53
2.7.1 Protocolo Macroelda. Metodología empleada	53
2.7.2 Equipos y materiales empleados para carbonatación	54
2.7.3 Equipos y materiales empleados para evaluación de la corrosión.	54
2.7.4 Medios de protección utilizados.	54
2.8 Ensayo de la Macroelda. Procedimiento y desarrollo.	54

Capítulo III Análisis de resultados obtenidos de los especímenes de hormigón fabricados con áridos reciclados.....	55
3.1 Ensayos del hormigón en estado fresco.....	55
3.1.1 Asentamiento.....	55
3.2 Ensayos del hormigón endurecido.....	56
3.2.1 Resistencia a compresión.....	56
3.2.2 Resistividad.....	58
3.2.3 Permeabilidad al aire.....	59
3.3 Método de la Mrocelda.....	60
Conclusiones Generales.....	63
Recomendaciones.....	64
Bibliografía.....	65
Anexos.....	67

Introducción

Los crecientes problemas que aquejan a los países en vía de desarrollo, respecto del agotamiento de los recursos naturales, plantea el gran desafío de como conjugar el desarrollo económico con la preservación del medio ambiente.

La construcción, además de significar un importante aporte al desarrollo socioeconómico de cada país, es una actividad que demanda altos niveles de consumo de recursos no renovables y de energía en sus distintas formas. Producto de estas características, se trata de una actividad que genera fuertes impactos sobre el medio ambiente.

Uno de los impactos ambientales de la construcción proviene de sus residuos sólidos. Mal manejados al interior de la obra, los mismos pueden constituirse en factores de riesgo de incendio, exponen a los trabajadores a posibles accidentes, deterioran el entorno de trabajo, afectan negativamente el medio ambiente y resultan en un pésimo impacto estético.

Los volúmenes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) producidos a nivel internacional constituyen un elevado por ciento del total de los residuos generados por la sociedad. De acuerdo con datos aportados por Tam (Tam et al., 2008), estos valores son bastante dispersos en los diferentes países y oscilan entre el 10 y 70%. La producción de los mismos, según (Martínez-Lage, 2007), alcanza cifras en el orden de los 300 a los 750 kg/hab/año a nivel internacional.

En el caso de Cuba según datos de la Dirección de Planeamiento y Servicios Comunes, el Ministerio de Economía y Planificación y la Oficina Nacional de Estadísticas, la cantidad de residuos recolectados está en el orden de los 350 kg/hab/año entre los años 2001-2006 (Pavon de la Fe et al., 2010).

El hormigón reforzado con varillas de acero es uno de los materiales de construcción más usado en todo el mundo, sin embargo, presenta el inconveniente de ser susceptible 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.

Para estimar la vida útil de una estructura de hormigón reforzado, es necesario conocer la velocidad con la cual se corroe el acero embebido en el hormigón. La cinética electroquímica trata los mecanismos presentes en la corrosión metálica y su evolución en el tiempo. Se describe la importancia de los procesos de polarización por activación y por concentración, así como las técnicas empleadas para conocer la cinética de los procesos de corrosión.

La corrosión del refuerzo metálico embebido es reconocida como uno de los mayores problemas en estructuras de hormigón convirtiéndose en un tema que requiere la atención de los ingenieros de mantenimiento de estructuras de hormigón, tales como carreteras y

puentes. El fenómeno de oxidación del refuerzo metálico afecta significativamente las características funcionales del hormigón armado tales como la adherencia, además de inducir la formación de agrietamientos y desprendimientos de fracciones de hormigón, lo que compromete la integridad estructural.

Una de las condicionantes del proceso corrosivo del acero de refuerzo en las estructuras de hormigón, es precisamente el fenómeno de la carbonatación. El hormigón del recubrimiento de cualquier elemento estructural, puede perder la alcalinidad que mantiene protegida a la varilla de acero de refuerzo, lo que puede producir una herrumbre que se puede expandir a toda la armadura, proceso que termina por hacer “explotar” y desprender el hormigón que la recubre (recubrimiento)

Generalmente, el fenómeno de la carbonatación, es un proceso físico-químico complejo que modifica lentamente en el tiempo la estructura del hormigón, induciendo a cambios en sus propiedades físicas. Por lo general, el fenómeno avanza del exterior al interior de la masa de hormigón del elemento; ahí tiene mucho que ver el tiempo y la profundidad de afectación (Vidaud, 2012).

Los carbonatos penetran a través de los poros del hormigón hasta alcanzar y despasivar al acero de refuerzo.

La carbonatación es un tipo de reacción ácida que puede afectar de manera importante la durabilidad del hormigón. Se trata de un proceso lento, que resulta de una reacción química en la que el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), presente en la pasta de cemento, reacciona con el dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera, y forma carbonato de calcio (CaCO_3); tal y como se representa en la ecuación química.



Producto del efecto físico-químico resultante de esta reacción, se produce una degradación lenta y de continuo avance; desde la superficie hacia el interior del elemento de hormigón. El mecanismo de reacción ácida por el cual se produce la carbonatación genera un descenso del pH del hormigón, lo que provoca la destrucción de la capa pasivante sobre el acero, y con ello un ascenso en la velocidad de corrosión de las armaduras. Según los especialistas, se establece un valor crítico para el pH de 12 a 13 en condiciones normales, alrededor de 9.5 o debajo del cual ya no puede garantizarse la protección (pasivación) de la armadura y puede comenzar un proceso de corrosión por carbonatación. El nivel de pH de un hormigón completamente carbonatado, suele oscilar entre 7 y 8 (Vidaud, 2012).

La manera más fácil de detectar la carbonatación en una estructura es cortar una muestra de hormigón (preferentemente cerca de un borde) donde se sospeche que hay carbonatación. Después de limpiar la muestra de hormigón del polvo residual, se añade una solución hidroalcohólica de fenolftaleína al 1 %. Las áreas carbonatadas del hormigón no cambiarán de color, mientras que las áreas con un pH mayor de 9 a 9.5 adquirirán un

color rosado brillante. El cambio de color muestra cuán profundo ha progresado el "frente" de carbonatación dentro del hormigón. Existen otros métodos y otros indicadores para detectar la carbonatación, pero éste es el método más fácil y común de detección.

Problema científico:

¿Cómo se comporta la corrosión en especímenes de hormigón armado elaborados con áridos reciclados en tiempo real y bajo condiciones ambientales controladas?

Hipótesis:

A partir del encapsulamiento de la fracción gruesa de 5-9 mm de los áridos reciclados para la producción de hormigones hidráulicos con áridos reciclados se logra una reducción de la corrosión una vez sometidos a un proceso de carbonatación los especímenes.

Campo de Acción

Especímenes de hormigón armado con áridos reciclados.

Objetivo General

Determinar mediante el método de la Macrocelda el comportamiento de la corrosión de los especímenes de hormigón armado elaborados con áridos reciclados.

Objetivos específicos:

- Evaluar ensayos de durabilidad como indicio del comienzo de la corrosión.
- Elaborar una propuesta de procedimiento para evaluar en tiempo real el grado de corrosión del acero en especímenes de hormigón armado con áridos reciclados por el método de la Macrocelda.
- Evaluar la influencia de la encapsulación de la fracción de 5-9 mm en la corrosión de hormigón armado con áridos reciclados.

Tareas científicas:

- Revisión bibliográfica acerca de la corrosión en ambientes carbonatados de hormigones armados con áridos reciclados.
- Caracterización de los áridos reciclados empleados en la producción de hormigones.
- Evaluación del comportamiento Físico-Mecánico y de durabilidad en hormigones armados elaborados con áridos reciclados encapsulados.
- Diseño del protocolo de la Macrocelda para evaluar el estado de corrosión en los especímenes de hormigón armados elaborados con áridos reciclados.

Novedad científica:

La aplicación de los estudios de la corrosión del acero de refuerzo mediante el método de la Macrocelda para hormigones elaborados con áridos reciclados en tiempo real y condiciones ambientales controladas.

Metodología

Se utilizarán métodos y técnicas experimentales en la obtención de los resultados deseados.

Aportes esperados

Prácticos

- Mayor uso de los áridos reciclados lo que conlleva a una disminución de la explotación de canteras.

Científico

- Constituye la primera acción de estudio de corrosión en hormigones armados con áridos reciclados encapsulado mediante la aplicación del método de la Macrocela.

Metodológico

- Desarrollo de una metodología para el estudio de corrosión en hormigones hidráulicos con áridos reciclados mediante el encapsulamiento.

Estructura del trabajo

Capítulo I

Estado del arte sobre la corrosión del acero en hormigones con áridos reciclados

Capítulo II

Aplicación del protocolo de la Macrocela para la evaluación de la corrosión de especímenes de hormigón armado con áridos reciclados, fabricados con cemento P-35.

Capítulo III

Análisis de resultados obtenidos de corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón fabricados con áridos reciclados.

Capítulo I: Estado del arte sobre la corrosión del acero en hormigones con áridos reciclados

1.1 Hormigón hidráulico con áridos reciclados encapsulados

La fabricación de hormigones con áridos reciclados conlleva un aumento de la consistencia para una misma relación agua-cemento, respecto a un hormigón convencional. Al presentar los áridos reciclados valores elevados en su absorción, la cantidad de agua absorbida por los mismos durante el proceso de amasado del hormigón es mayor, mientras mayor sea el porcentaje de sustitución del árido. Como consecuencia de este proceso se producirá una reducción de la relación agua-cemento efectiva, y, por lo tanto, un aumento de la consistencia del hormigón fresco (Benedicto, 2010).

La durabilidad del hormigón se ha convertido recientemente en el centro de investigación de numerosos autores y especialistas en todo el mundo. En el caso particular de Cuba, por ser una isla con edificaciones muy cerca del ambiente marino, es de vital importancia el estudio del comportamiento durable de este material frente a los diferentes agentes agresivos externos. Varios son los factores que condicionan las propiedades durables del hormigón. Desde el punto de vista interno, se encuentran la composición y distribución de sus componentes o materias primas, así como las características propias de su diseño estructural. Aquellos con particularidades externas al material, como son el grado de exposición y la agresividad del medio en que se encuentra, también son determinantes de esta propiedad.

El hormigón puede definirse según la (NC_120, 2014) “como un material constituido por la mezcla de cemento, árido grueso, árido fino y agua, con o sin la incorporación de aditivos o adiciones, que desarrolla sus propiedades por la hidratación del cemento”.

De manera más general puede decirse que el hormigón es un material pétreo aglomerado, formado por un esqueleto de material de relleno (áridos) unido por una matriz cementante. En función del tipo de aglomerante que se utilice se distinguen entonces los hormigones de cal, yeso, asfalto, resinas, etc.

Se entiende por durabilidad de una estructura de hormigón a la capacidad para soportar durante la vida útil para la que ha sido diseñada, las acciones físicas y químicas del ambiente donde estará expuesta. Como vida útil se comprende el período de tiempo durante el cual la estructura mantiene sus condiciones de servicio y su estética, sin necesidad de efectuar reparaciones capitales, aunque con el mantenimiento establecido para la misma.

Para que una obra logre satisfactoriamente su vida útil, no es suficiente con un diseño resistente hormigón, es además necesario que sus elementos componentes sean

diseñados y contruidos de manera tal que se contemplen también los requisitos básicos de durabilidad. En función de las condiciones donde se encontrará expuesto, de modo tal que responda a las exigencias de funcionalidad por el período de diseño. Partiendo de este hecho, se comprende que desde la fase de diseño han de tenerse en consideración estos aspectos, de forma que se haga la selección correcta de las materias primas componentes del hormigón, así como sus propios parámetros técnicos, no solamente para resistir las cargas físicas ordinarias, sino también para garantizar su durabilidad (Hernández, 2009). La integridad de una estructura de hormigón armado depende tanto de la calidad de sus componentes como de su dosificación, para lograr las mejores propiedades que garanticen un período 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 (Moreno, 2001).

La experiencia internacional sobre desarreglos por corrosión en estructuras de hormigón armado, demuestra que la corrosión se incrementa en las zonas marítimas de climas semitropicales y subtropicales, con temperaturas elevadas y apreciable humedad relativa, en comparación con los resultados que se obtienen en climas fríos o templados. De esta manera, en las regiones tropicales se hace más difícil la prevención, sea por el conveniente diseño estructural o la adopción de apropiados sistemas de construcción.

1.1.1 Materiales pétreos reciclados

Los materiales pétreos constituyen un importantísimo grupo de materiales en la construcción de cualquier tipo de obra. Sus características generales, entre las que se destacan sus resistencias tanto físico-mecánicas como químicas, los hacen materiales apropiados para diversos elementos constructivos que han de resistir elevadas cargas y efectos agresivos del ambiente (ARENAS, 2012).

De acuerdo con su origen los materiales pétreos (o piedras) pueden ser divididos en dos grupos: naturales y artificiales. Entre los pétreos naturales figuran los distintos tipos de rocas, las que constituyen la fuente más importante de suministro de materias primas para la construcción y que ha sido utilizada por el hombre a través de su historia. Los materiales pétreos artificiales se producen, la inmensa mayoría, expensas de los naturales, por ejemplo, los productos a base de arcilla cocida (ladrillos, tejas, losas, etc.), el vidrio, el hormigón, etc.

Los pétreos naturales se encuentran originalmente en la corteza terrestre formando masas denominadas rocas, las cuales pueden ser mono minerales o poliminerales,

aparte de otras sustancias que pueden ser no minerales. Los pétreos naturales tienen un amplio uso en la construcción, empleándose como áridos, balasto para ferrocarriles, enchapes, pisos, muros de mampostería etc. No obstante, su estado natural, ellos precisan de una serie de procesos para su elaboración y comercialización como productos, siendo los fundamentales la extracción y la conformación.

1.1.1.1 Clasificación de los residuos

Las clasificaciones de los residuos pueden ser según su procedencia (Martínez-Lage, 2007) :

- **De demolición:** Son los materiales y productos de construcción que se originan como resultado de las operaciones de desmontaje, desmantelamiento y derribo de edificios, de instalaciones etc. También deben ser considerados los residuos parciales, originados por los trabajos de reparación o de rehabilitación.
Existe un consenso bastante generalizado en asegurar que los volúmenes de generación por esta vía constituyen la mayoría de los escombros producidos en muchos países, aunque existen países donde la demolición no representa la mayoría de los escombros.
- **De construcción:** Son los que se originan en el proceso de ejecución de los trabajos de construcción, tanto de una planta de construcción, de rehabilitación o de reparación. Su origen es diverso: los hay que provienen de la propia acción de construir, originados por los materiales sobrantes: hormigones, morteros, cerámicas, etc. Otros provienen de los embalajes de los productos que llegan a la obra: madera, papel, plásticos, etc. Sus características de forma y de material son variadas. En este apartado también situaríamos la parte de residuos de rehabilitación correspondientes a la fase de construcción.
- **De excavación:** Son resultado de los trabajos de excavación, en general previos a la construcción. La composición de estos residuos es menos variable que la de los dos grupos anteriores. Tienen una composición más homogénea y son de naturaleza pétreo: arcillas, arenas, piedras, hormigones y obras de fábrica de los cimientos de la edificación existente.

1.1.1.2 Características según su peligrosidad

- Residuos banales: Aquellos que presentan una naturaleza similar a los residuos domésticos.
- Residuos especiales: Son aquellos potencialmente peligrosos para la salud y el medio ambiente, debido a su composición y propiedades, pues contienen sustancias inflamables, tóxicas, corrosivas, irritantes o que provocan reacciones

nocivas en contacto con otros materiales. Por tal razón requieren un tratamiento especial con el fin de aislarlos y de facilitar el tratamiento específico o la deposición controlada.

- Residuos inertes: Aquellos residuos no peligrosos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas. Son los que no presentan ningún riesgo de contaminación de las aguas, de los suelos y del aire. En general están constituidos por elementos minerales estables o inertes, en el sentido de que no son corrosivos, irritantes, inflamables, tóxicos, reactivos, etc. En definitiva, son plenamente compatibles con el medio ambiente. Los principales materiales que forman los residuos de construcción son de origen pétreo, y, por lo tanto, inertes. Pueden ser reutilizados en la propia obra o reciclados en centrales recicladoras de áridos mediante un sencillo proceso mecánico de machaqueo.

1.1.2 Propiedades de los áridos reciclados

Densidad.

La densidad en las fracciones más gruesas del árido reciclado es algo mayor que en las fracciones finas. Incluso en las mismas fracciones granulométricas, los resultados presentan gran disparidad. Sin duda se debe a la distinta naturaleza de los áridos con los que se fabricaron los hormigones originales. Aun así, puede concluirse que la densidad aumenta con el tamaño (ARENAS, 2012).

Granulometría.

La granulometría del árido reciclado depende fundamentalmente del sistema de trituración que se haya empleado en su proceso de producción. Las trituradoras de impacto, por lo general, son las que permiten alcanzar reducidos tamaños en los áridos produciendo como consecuencia mayor cantidad de fino. A estas trituradoras las siguen las de conos con una producción de fino inferior y las machacadoras de mandíbulas.

Al utilizar machacadoras de mandíbula y posteriormente una de impacto, la recuperación de árido grueso se reduce un 60%, mientras que con procesos adicionales se obtienen áridos reciclados gruesos de alta calidad con mínimo de mortero adherido, reduciendo la tasa de recuperación a un 35% (Nagataki et al., 2004).

Porosidad.

En los áridos reciclados se obtiene una alta porosidad debido a su alta capacidad para absorber agua. Diferentes estudios realizados (Hernández, 2009) sobre la penetración de agua en áridos reciclados son de dos a tres veces superior a los áridos naturales.

Estudios consultados (Benedicto, 2010) plantean que “la utilización de hormigones con densidades superiores a 2200 Kg/m^3 , dan como resultado áridos con una baja porosidad, mejorando esto la calidad de los nuevos hormigones”.

Absorción.

La absorción en los áridos reciclados alcanza valores muy superiores a los obtenidos en los áridos naturales debido a la cantidad de mortero adherido que presentan dichos áridos. La absorción de los áridos reciclados tiene una relación directa con la relación a/c del hormigón de origen.

El tamaño del árido reciclado influye de manera decisiva sobre la absorción. En las fracciones más finas la absorción es mayor, ya que en ellas la cantidad de mortero adherido es superior a las fracciones más gruesas, siendo más causado dicho efecto cuando menor sea la densidad del árido reciclado (Benedicto, 2010).

1.1.3 Propiedades del hormigón con áridos reciclados

1.1.3.1 Propiedades en estado fresco

Las principales diferencias del hormigón reciclado con el hormigón tradicional, en cuanto a sus propiedades en estado fresco, están en la consistencia y en la densidad. Los valores más frecuentes de densidad encontrados en la bibliografía aparecen en el rango de 2100 a 2400 kg/m^3 (Hernández, 2009).

- Densidad.

La densidad del hormigón fresco fabricado con árido reciclado es inferior a la del hormigón normal, debido a la menor densidad que presenta el árido reciclado como consecuencia del mortero adherido que envuelve la matriz rocosa. Los valores oscilan entre 2100 y 2400 kg/m^3 mientras que los áridos convencionales tienen unos valores de 2230 y 2410 kg/m^3 (ARENAS, 2012).

- Docilidad.

La docilidad o manejabilidad se definen como la idoneidad de un hormigón para adaptarse a formas determinadas con los medios de compactación de los que se dispone. Está relacionada con la deformabilidad (consistencia), la homogeneidad de los diferentes componentes y con la facilidad que presenta el hormigón para evacuar el aire de su interior obteniendo su compacidad máxima (CEREIJO, 2010).

- Consistencia

La consistencia es la facilidad que posee el hormigón fresco para mantener la forma. Depende principalmente del agua del amasado, pero se ve influenciada por otros factores como la granulometría, la forma del árido y la dosificación de cemento (CEREIJO, 2010).

La fabricación de hormigones con áridos reciclados conlleva un aumento de la consistencia para una misma relación agua-cemento, respecto a un hormigón convencional. Al presentar los áridos reciclados valores elevados en su absorción, la cantidad de agua absorbida por los áridos durante el proceso de amasado del hormigón aumentará, cuando sea mayor el porcentaje de sustitución del árido. Como consecuencia se producirá una reducción de la relación agua-cemento efectiva y, por lo tanto, un aumento de la consistencia del hormigón fresco (Benedicto, 2010).

- Aire ocluido.

Algunos estudios realizados han determinado incrementos en la cantidad de aire ocluido en hormigones fabricados con árido reciclado, con variaciones entre el hormigón de control y el hormigón reciclado inferiores al 7%. Sin embargo, la mayoría de los hormigones con árido reciclado no presentan variaciones considerables a tener en cuenta (ARENAS, 2012).

1.1.3.2 Propiedades en estado endurecido

Podemos hablar de hormigón endurecido cuando la pasta en estado fluido pasa al estado sólido, es decir cuando haya terminado la fase inicial de hidratación (fraguado)

- Densidad.

La menor densidad del árido reciclado hace que la densidad del hormigón reciclado endurecido sea inferior a la del hormigón convencional, como sucedía en el caso del hormigón reciclado fresco. El descenso de la densidad es prácticamente inapreciable cuando la sustitución del árido grueso es del 20% por áridos reciclados. Cuando la sustitución es del 50% por áridos reciclados la densidad experimenta una reducción media del 2%. Dicha reducción llega a un valor medio del 3,5% cuando el porcentaje sustituido de árido grueso es del 100% por áridos reciclados (Benedicto, 2010).

- Resistencia a cortante.

La disminución de la resistencia a cortante, según los estudio consultado de resistencia a cortante(CEREIJO, 2010), alcanzan el 26% cuando se sustituye únicamente el árido grueso. Dichas pérdidas alcanzan el 41% cuando la sustitución también se realiza en el árido fino.

Establecen que sustituciones por debajo del 25% del árido grueso apenas afectan a la resistencia a cortante de elementos estructurales fabricados con áridos reciclados. Otros estudios (ARENAS, 2012) establecen un buen comportamiento a cortante del hormigón reciclado con sustituciones del 50% del árido grueso.

- Resistencia a flexo-tracción.

Las variaciones de la resistencia a flexo-tracción en los hormigones reciclados presentan unas oscilaciones, en función del porcentaje del árido sustituido, similar a las experimentadas en la resistencia a tracción. Según los datos de los estudios consultados, las reducciones de resistencia son pequeñas cuando la sustitución del árido grueso no es superior al 50% siendo la media alrededor del 5%. Cuando la sustitución del árido grueso es del 100% los valores son más notables, pero sin una gran diferencia de los porcentajes de los áridos gruesos con una sustitución inferior al 50%, siendo el valor medio alrededor del 10%. Si realizamos una sustitución del 100% del árido grueso y fino, los valores son aún mayores siendo desde un 15% hasta un 29% (ARENAS, 2012).

- Resistencia a compresión

La influencia del porcentaje de árido reciclado en la resistencia del hormigón es muy notable. En los estudios consultados, en los que se sustituye únicamente el árido grueso, las pérdidas de resistencia son muy pequeñas cuando el porcentaje de sustitución no supera el 30% (Etxeberria et al., 2007).

- Retracción por secado.

En los hormigones con áridos reciclados la retracción por secado es mayor que en los convencionales. Dicho aumento puede ser debido, entre otras causas, a que el módulo de elasticidad del árido reciclado es inferior al del árido convencional por la cantidad de mortero que lleva adherido, a la mayor cantidad de agua empleada en su dosificación para conseguir la misma consistencia que en el hormigón convencional y por la mayor absorción del árido reciclado (ALAEJOS, 2006).

1.2 Durabilidad del hormigón armado con áridos reciclados

La durabilidad de los hormigones hidráulicos se define como la habilidad de resistir la acción del agua, ataques químicos, abrasión y cualquier otro proceso de deterioro. Un hormigón durable será capaz de mantener su forma original, calidad y vida útil en el ambiente a que sea expuesto. Dado que las estructuras pueden ser expuestas a disímiles condiciones ambientales, los tipos de diseño para la elaboración del hormigón pueden

variar en función de la agresividad del medio, de ahí la importancia del conocimiento de los tipos de exposición relativos a las acciones medioambientales.

La (NC_250, 2005) tiene en cuenta lo que se entiende por durabilidad considerado como vida útil de una estructura, al intervalo de tiempo durante el cual la misma mantiene su forma original, sus propiedades resistentes, sus condiciones de servicio y sus características estéticas, sin necesidad de efectuar reparaciones capitales, pero con mantenimientos ligeros sistemáticos.

La selección de las materias primas y la dosificación del hormigón deberá hacerse siempre a la vista de las características particulares de la obra o parte de la misma de que se trate, así como de la naturaleza de las acciones o ataques que sean de prever en cada caso. Las consideraciones más importantes a tener en cuenta a la hora de establecer las características y puesta en obra de un elemento de hormigón armado según (Fomento, 2008) son las siguientes:

- Recubrimientos: Es la distancia entre la superficie exterior de la armadura y la superficie del hormigón más cercana. Un adecuado recubrimiento posibilita la protección de las armaduras contra los efectos de la corrosión. Es muy importante el uso de separadores para poder garantizar los recubrimientos mínimos.
- Porosidad: Es el contenido de huecos dentro del elemento de hormigón viene determinado por la dosificación del hormigón granulometría del árido y por la puesta en obra. Una mayor porosidad convertirá al hormigón en un elemento más permeable al agua, más penetrable a los elementos peligrosos del ambiente y estará más afectado por las heladas.
- Resistencia frente al ataque de sulfatos, agua de mar o erosión: Se debe confeccionar un hormigón acorde con las circunstancias ambientales con las que va a convivir, prolongándose de esta forma la vida útil del elemento.
- Dosificación del hormigón: Es muy importante las relaciones agua/cemento, el contenido mínimo y tipo de cemento y el tipo de áridos utilizados en función del ambiente o terreno en el que se va a realizar el elemento. Todas estas consideraciones influirán en la trabajabilidad del hormigón en su puesta en obra y en una adecuada ocupación de los espacios existentes en el elemento a ejecutar, condicionando la compacidad del hormigón y el adecuado recubrimiento de las armaduras de acero.

- La durabilidad depende de:
 - La Densidad del hormigón: adecuada cantidad de cemento y relación a/c.
 - De la permeabilidad: adecuada cantidad de cemento y relación a/c.
 - Completa compactación.
 - Correcto curado: tiempo y condiciones de temperatura y humedad.

1.2.1 Ensayos de durabilidad

Permeabilidad al aire

En la actualidad uno de los métodos no destructivos que más se utiliza mundialmente para evaluar "in-situ" la penetrabilidad de sustancias nocivas al interior del hormigón es el Torrent Permeability Tester. Este dispositivo de ensayo no destructivo, está diseñado para la medición "in-situ" de la permeabilidad al aire del recubrimiento de hormigón. Se basa en crear vacío dentro de una cámara colocada sobre la superficie del mismo y en medir la velocidad con que la presión retorna al valor atmosférico. Cuanto más permeable es el hormigón, más rápido se recupera la presión en la celda de vacío. Los datos de la medición son procesados por un microprocesador que indica el valor del coeficiente de permeabilidad.

Resistividad

Andrade propuso en 2010 la resistividad eléctrica como propiedad del hormigón endurecido que, además de relacionarse con la velocidad de corrosión de armadura puede estimar el coeficiente de difusión del agresivo en su interior a partir de la ley de Nernst-Einstein, la cual relaciona conductividad y difusividad en condiciones de saturación del hormigón. Años más tarde Andrade propone un modelo de cálculo para la predicción de la vida útil basada en este indicador. (Andrade and d'Andréa 2010)

La resistividad eléctrica inversa a la conductividad, se trata de una medida volumétrica de la resistencia eléctrica que mediante la ley de Ohm se expresa como la relación entre el voltaje y la corriente aplicada.

1.2.2 Factores que influyen en la durabilidad del hormigón armado con áridos reciclados

Los principales fenómenos de deterioro del hormigón son: la reacción álcali-agregado, hielo y deshielo, corrosión por sulfatos, cloruros, nitratos, hidróxidos y otras sales, corrosión por ácidos, lavado del hormigón, carbonatación, erosión, cavitación y los efectos de la corrosión del acero de refuerzo. El comportamiento de los hormigones a estos fenómenos, se pueden establecer mediante distintos ensayos, denominados, ensayos de durabilidad.

- La reacción álcali-agregado

La causa de que se incremente el contenido de álcalis en los cementos producidos en el mundo, es el mejor control de la emisión de polvo de la industria cementera. Los álcalis son muy volátiles, en especial el potasio y mientras no se exigió la captación de polvos, ellos eran evacuados en conjunto con los gases de combustión. Ahora cuando éstos polvos son reciclados en el proceso, se genera un ciclo de álcalis con un incremento constante en su concentración tanto en el horno como en el clinker producido (Rodríguez, 2009).

Se reconocen dos tipos de reacciones álcali-agregado:

- la reacción álcali-sílice.
 - la reacción álcali- carbonato.
- Hielo y deshielo

Este fenómeno es de especial importancia en los países fríos, donde las variaciones de temperatura oscilan alrededor de la temperatura de congelación del agua. El mecanismo es muy simple, cuando el hormigón es permeable el agua penetra en sus poros progresivamente, y cuando la temperatura disminuye y se congela dentro de los poros, debido al efecto de la dilatación anómala del agua, en lugar de seguir disminuyendo su volumen, lo incrementa, ejerciendo entonces una tensión interna extraordinaria que provoca el agrietamiento del material.

- Erosión

Los fenómenos erosivos se presentan por la influencia de agentes en circulación, como vehículos, personas, accesorios, agua, etc. Las aguas en movimiento constituyen un importante medio de transporte de material detrítico, principalmente en canales, ríos, etc. y en ocasiones se agrava su capacidad erosiva por el efecto de la cavitación.

- Corrosión por ácidos

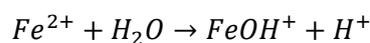
Las aguas que contienen ácidos se distinguen por un pH menor de 7, los cuales generan corrosión. En este grupo pueden situarse las aguas ricas en CO₂. La acción de los ácidos sobre el hormigón genera la conversión de los compuestos cálcicos (CH, SCH, CASH) en sales cálcicas del ácido actuante, siendo en ocasiones sales solubles que pueden ser removidas fácilmente por lixiviación, incrementando la porosidad del material y destruyendo la estructura de la pasta endurecida.

- Carbonatación

En el diseño de estructuras de hormigón, la carbonatación es un factor importante que determinan la vida útil en servicio de una estructura de hormigón armado. Según la (NC_355, 2004) la carbonatación se puede definir como la reducción de la alcalinidad del hormigón por acción de los componentes ácidos de la atmósfera dióxido de carbono (CO₂) y de azufre (SO₂).

La cantidad de Ca(OH)₂ procedente del hidrolisis del cemento Portland puede llegar hasta el 25% del peso del cemento empleado, confiriendo así un elevado carácter básico o alcalino (pH>12) a las pastas, morteros u hormigones. Los hormigones confeccionados con cementos poseerán elevada alcalinidad, la cual proporcionará un ambiente protector frente al medio exterior a las armaduras existentes, dotándolas de una capa de óxido pasivante sobre las mismas (Guiner, 2006).

Los cloruros de la solución de poros del hormigón pueden provocar roturas localizadas en puntos debilitados de la capa protectora del acero. El ion cloruro penetra en la película de óxido, a través de los poros u otro defecto, con mayor facilidad que otros iones, o pueden dispersar en forma coloidal la película de óxido e incrementar su permeabilidad. Se forman así diminutos ánodos de metal activo rodeados por grandes áreas catódicas de metal pasivo. El ataque de cloruro comienza con la picadura en los puntos débiles de la interface acero-hormigón. Un punto débil se puede generar debido a una caída local del pH, a un hueco de aire por mala compactación, a una fisura del hormigón o a un defecto de la superficie del acero. La formación de ánodos locales en los puntos débiles crea diferencia de potencial que atraen cloruros. Al eliminar oxígeno en el comienzo de la picadura, la superficie del acero situada bajo los productos sólidos de la corrosión se acidifica, según la siguiente ecuación (Bermúdez Odriozola, 2007):



1.2.3 Resultados de la carbonatación al hormigón y el acero

1.2.3.1 Factores que favorecen la corrosión

Existen ambientes agresivos o sustancias que se añaden durante el amasado, que pueden provocar la corrosión de las armaduras. Esencialmente son dos las causas que pueden dar lugar a la destrucción de la capa pasivante del acero y desencadenar la corrosión:

- La presencia de una cantidad suficiente de cloruros (tanto porque se añadan durante el amasado, como porque penetren desde el exterior) u otros iones despasivantes en contacto con la armadura.

- La disminución de la alcalinidad del hormigón por reacción con sustancias ácidas del medio.

Para que se produzca la corrosión se necesitan las siguientes condiciones:

- a) La presencia de un ánodo que produce los electrones.
- b) el cátodo en la superficie donde se efectúa la reducción.
- c) la disponibilidad de oxígeno en correspondencia con el cátodo.
- d) la disponibilidad de agua (humedad) en la ubicación del cátodo.
- e) una conexión eléctrica entre el ánodo y el cátodo que permita la transferencia de electrones.

1.2.3.2 Influencia del pH, temperatura y humedad relativa

¿Por qué es un problema la pérdida de pH? Porque el hormigón, con su ambiente altamente alcalino (rango de pH de 12 a 13), protege al acero de refuerzo contra la corrosión. Esta protección se logra por la formación de una capa de óxido pasivo sobre la superficie del acero que permanece estable en el ambiente altamente alcalino.

En el interior del hormigón las barras de refuerzo están protegidas por una capa microscópica de óxido, que se forma sobre la superficie e impide la disolución del hierro, imposibilitando el proceso corrosivo. Esta película, denominada capa pasiva, se genera por la alcalinidad del hormigón, que alcanza valores de pH superiores a 12,5. La protección contra la corrosión se pierde si el valor del pH es 9.5. Según los especialistas, se establece un valor crítico para el pH, alrededor de 9.5; por debajo del cual ya no puede garantizarse la protección (pasivación) de la armadura y puede comenzar un proceso de corrosión por carbonatación. El nivel de pH de un hormigón completamente carbonatado, suele oscilar entre 7 y 8.

Si el hormigón está demasiado seco (Humedad Relativa menor al 40%) el CO_2 no se disuelve y no se produce el fenómeno de la carbonatación; si por el contrario el hormigón se encuentra demasiado húmedo (Humedad Relativa mayor al 90%) el CO_2 no puede penetrar al hormigón y por tanto este, tampoco puede ser carbonatado. La literatura especializada refiere que las condiciones óptimas para que se produzca la carbonatación, es cuando la humedad relativa se encuentra entre 40 y 90%. La difusión de la carbonatación, la humedad relativa del aire de los poros existentes en la masa de hormigón, juega un papel decisivo, debido a que el coeficiente de difusión del CO_2 es mucho mayor

en el aire que en el agua, por tanto, si los poros están saturados de agua la penetración del gas es muy débil y la reacción es prácticamente inexistente (Vidaud, 2012).

La temperatura juega un papel doble en los procesos de deterioro. Por un lado, su incremento, promueve un aumento de la velocidad de corrosión y de la movilidad de los iones, pero por otro, su disminución puede dar lugar a condensaciones del agua, que a su vez pueden producir incrementos locales de contenidos en humedad.

Es importante destacar que la humedad, el oxígeno y la temperatura pueden tener efectos contrapuestos. Así, por ejemplo, una mayor humedad facilita la corrosión, pero impide el acceso de oxígeno, o bien un incremento de temperatura, acelera la corrosión, pero disminuye la condensación.

1.2.3.3 Determinación de la profundidad de la carbonatación

La profundidad de carbonatación se mide fácilmente, rociando el hormigón en la superficie de una probeta ensayada con solución de indicador de fenolftaleína. La carbonatación en la profundidad debe entonces estar relacionada con la cobertura (la media y su variación) que la medida en que la carbonatación ha alcanzado la barra de refuerzo puede ser estimado y la tasa futura de carbonatación estimada.

Pero para la mayoría de las consideraciones prácticas es un muy preciso y confiable técnica. Algunos agregados finos de color oscuro pueden causar problemas haciendo la transición del color difícil de ver. Muy poco consolidada y hormigón subterráneo expuestos a carbonatos disueltos en el agua puede no mostrar frentes de carbonación claramente definidos debido al progreso no uniforme del frente de carbonatación.

La carbonatación se mide fácilmente mediante la exposición de pulverización sobre el indicador de fenolftaleína. Puede hacerse o bien por cortar una superficie fresca (por ejemplo, entre el grupo perforaciones de cloruro, o bien cortar y dividir el núcleo en el laboratorio.

La solución de fenolftaleína permanecerá clara cuando el hormigón carbonatado se vuelve rosa donde el hormigón sigue siendo alcalino. La mejor solución de indicador para el máximo contraste de la coloración rosa es una solución de fenolftaleína en alcohol y agua, generalmente indicador de 1 g en 100 ml de alcohol / agua (mezcla 50:50) o más alcohol al agua.

El muestreo de la profundidad de carbonatación puede permitir la desviación de la profundidad de carbonatación a calcular. Si esto se compara con la cubierta de refuerzo promedio entonces la cantidad del acero despasivado puede ser estimado. Si la tasa de carbonatación puede determinarse a partir de datos históricos y pruebas de laboratorio, la progresión se puede calcular con la despasivación en el tiempo.

La fenolftaleína cambia de color a partir de un pH 9. La capa pasiva se descompone a pH 10-11. Si el frente de carbonatación tiene una anchura de 5 a 10 mm, el acero puede ser despasivado a 5 mm del cambio de color del indicador. Mediante la fenolftaleína se mide las profundidades de carbonatación para determinar el grado de despasivación. Algunos agregados pueden confundir las lecturas de fenolftaleína. Algunas mezclas de hormigón son de color oscuro y ver el cambio de color puede ser difícil. Se debe tener cuidado de que no se produzca una contaminación de la superficie con polvo, por lo tanto se limpia la superficie y luego se atomiza con la fenolftaleína al hormigón.

1.3 Corrosión del acero de refuerzo por carbonatación

La carbonatación es un proceso de penetración del dióxido de carbono atmosférico a través de la porosidad del hormigón, neutralizando su alcalinidad. El proceso de carbonatación reduce el pH a un 8 o 9, en cuyos valores, la capa de óxido de las barras no es estable y por penetración de oxígeno y humedad, se establece el proceso de corrosión.

El hormigón es un material muy poroso, el cual permite la penetración en su interior del CO₂ del aire a través de los poros. Cuando esto sucede se produce la reacción del CO₂ con la fase sólida intersticial saturada de hidróxido de calcio del hormigón y de los compuestos hidratados del cemento en equilibrio con dicha fase sólida, formándose carbonato de calcio (Méndez, 2010). En términos simplificados, la reacción para la fase acuosa se puede describir como: ver (figura 1.1)

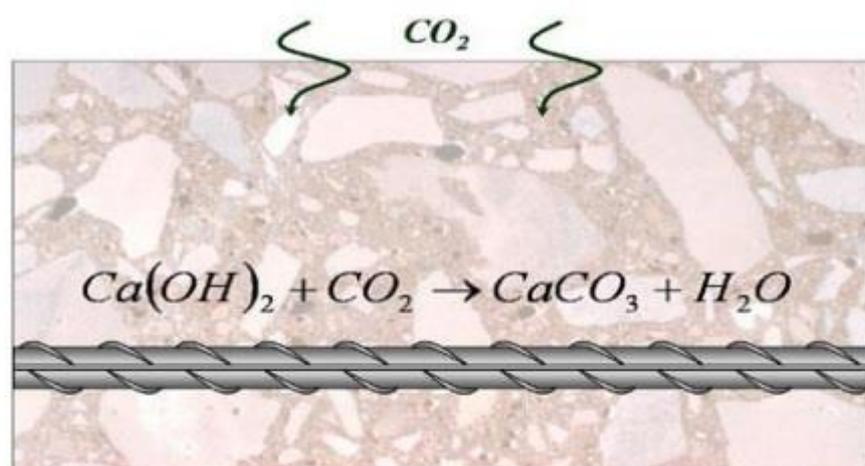


Figura 1.1: Ecuación que describe la reacción para la fase acuosa.

La carbonatación será tanto más activa cuanto más poroso sea el hormigón, no ocurriendo en hormigones compactos de buena calidad y cuya capa de protección de barras tenga un buen espesor. Si los poros del hormigón se encuentran secos, el CO₂ se difunde fácilmente,

pero la carbonatación no puede ocurrir debido a la falta de agua. Este caso solo se presenta en hormigones que están sobre secados, como ocurre en climas muy secos. Por otra parte, si los poros están llenos de agua hay apenas alguna carbonatación debido de la poca difusión de CO_2 en el agua, este es el caso de estructuras que se encuentran sumergidas. Finalmente, si los poros están parcialmente llenos de agua, la carbonatación puede proceder hasta un espesor donde los poros del hormigón están secos (Vidaud, 2012).

Cuando los agentes agresivos no están presentes desde la elaboración del hormigón, 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:

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

1.3.1 Fenómeno de corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón con áridos reciclados

La carbonatación del hormigón es un aspecto muy preocupante dadas las graves consecuencias que puede acarrear, derivadas de la corrosión de las armaduras ocultas en el hormigón, responsable de la sustentación de las estructuras, edificaciones y las obras públicas.

La principal causa de deterioro en estructuras de hormigón es la corrosión del acero de refuerzo, generalmente iniciada por mecanismos de carbonatación y difusión de cloruros. La carbonatación es un proceso químico donde el dióxido de carbono se difunde a través de los poros capilares interconectados del hormigón, y reacciona con algunas de las fases hidratadas del cemento tales como el hidróxido de calcio (CH) y los silicatos cálcicos hidratados (CSH), aunque también puede reaccionar con otras fases no hidratadas como el silicato tricálcico (C_3S) y el dicálcico (C_2S). Estas diferentes reacciones afectan la microestructura y propiedades de la pasta cementicia, al promover la disminución de la alcalinidad en la solución del poro y con ello un decrecimiento en los valores de pH desde 12,5 a 9,5, todo esto contribuyen a la destrucción de la película pasivante protectora del acero de refuerzo. La velocidad de carbonatación en los hormigones es afectada por las

características de la atmósfera de exposición tales como humedad relativa, concentración de CO₂ y temperatura (Vidaud, 2012).

La carbonatación es un proceso lento que ocurre en el hormigón. Si la degradación del hormigón producto a este fenómeno aparece rápidamente, es porque desde su puesta en obra el mismo está fisurado, mal dosificado, o presenta un alto grado de porosidad. La figura 1.2 muestra un modelo simplificado del proceso de la carbonatación del hormigón (Méndez, 2010).

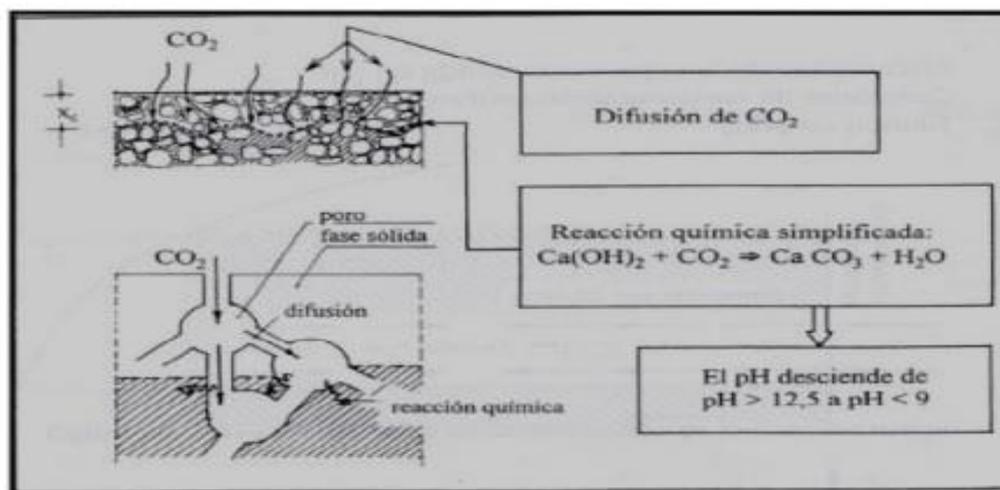


Figura 1.2: Proceso de carbonatación del hormigón. (Imagen tomada de Tesis de máster de Leticia Rafaelina Pérez Méndez).

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

$$X_c = K_c \cdot \sqrt{t}$$

Donde:

X_c : Profundidad de la capa carbonatada mm

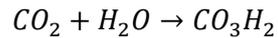
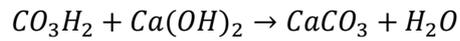
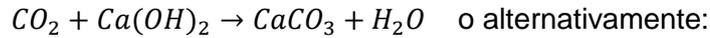
K_c : Constante de carbonatación $\left(\frac{mm}{año^{0.5}}\right)$

t : Tiempo (años)

En el interior del hormigón las barras de refuerzo están protegidas por una capa microscópica de óxido, que se forma sobre la superficie e impide la disolución del hierro, imposibilitando el proceso corrosivo. Esta película, denominada capa pasiva, se genera por la alcalinidad del hormigón, que alcanza valores de pH superiores a 12,5. La protección contra la corrosión se pierde si el valor del pH es 9 o menos.

La corrosión por la carbonatación del hormigón se inicia con la combinación de la portlandita u hidróxido de calcio del cemento con el CO₂ de la atmósfera, que reduce la alcalinidad del hormigón y disminuye su eficacia en la protección del refuerzo.

Las reacciones tienen la siguiente forma:



Este tipo de corrosión se potencializa en hormigones con poros llenos de aire.

1.3.1.1 Definición de procesos

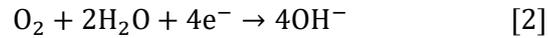
Llamamos corrosión a la reacción de un metal o aleación con el medio que le rodea. Por este proceso los metales pasan de su estado elemental, a su estado combinado que presentan en la naturaleza, formando compuestos con otros elementos, como óxidos, sulfuros, etc... Esta reacción, mediante el cual el metal se transforma, se produce mediante una reacción espontánea. Este proceso, en el que se produce la oxidación del elemento, se conoce como corrosión y representa la disminución paulatina del volumen del metal.

Si la corrosión metálica tiene lugar en un medio acuoso, se trata de un fenómeno de carácter electroquímico. En este contexto, se produce una reacción de oxidación y otra de reducción. Dependiendo del nivel de Fermi del metal, este se oxidará o reducirá, produciendo un intercambio de electrones en una dirección o en otra. El nivel de Fermi nos indica la medida de la energía de los electrones más ligados en un sólido. Cuanto menor es la energía del nivel de Fermi, más ligados están los electrones, y más fácil será la recepción de electrones. Dependiendo de la diferencia de este nivel en comparación con otros metales o disoluciones, un metal se puede comportar como oxidante o como reductor. De producirse la oxidación del metal, los electrones presentes en su superficie se separarán del metal (proceso farádico) y se producirá la oxidación de su superficie. Este proceso también es conocido como proceso anódico, produciéndose la disolución del hierro.

En el ánodo se produce la oxidación del hierro, al estado de óxido ferroso desprendiendo electrones, respondiendo a la siguiente reacción:(González Fernández, 2007)



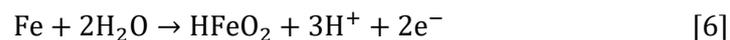
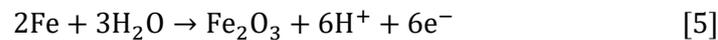
Después de producirse la reacción [1], en el cátodo, el oxígeno disuelto en el agua se combina con los electrones suministrados por el ánodo dando lugar a la formación de iones hidroxilo:



Los iones hidróxido son transportados al ánodo combinándose con los cationes Fe^{2+} , formándose hidróxido de hierro:



Dependiendo del pH y de los potenciales electroquímicos, son posibles también las siguientes reacciones:



En el gráfico nº 1 podemos observar el doble proceso que se produce en la corrosión de una armadura de acero embebida en hormigón armado:

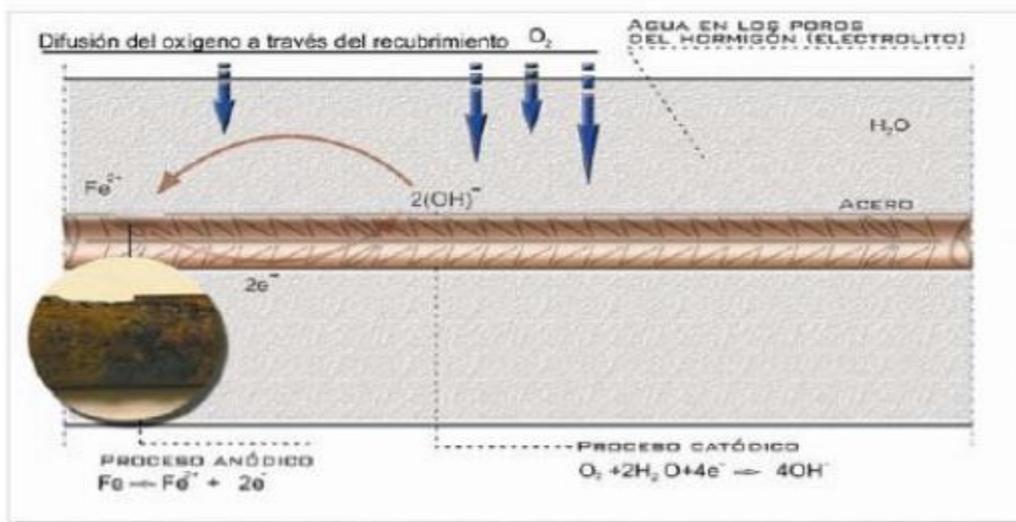


Gráfico nº 1 – Corrosión electroquímica. Proceso anódico y catódico. Fuente: “Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado: causas y procedimientos de rehabilitación”.

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

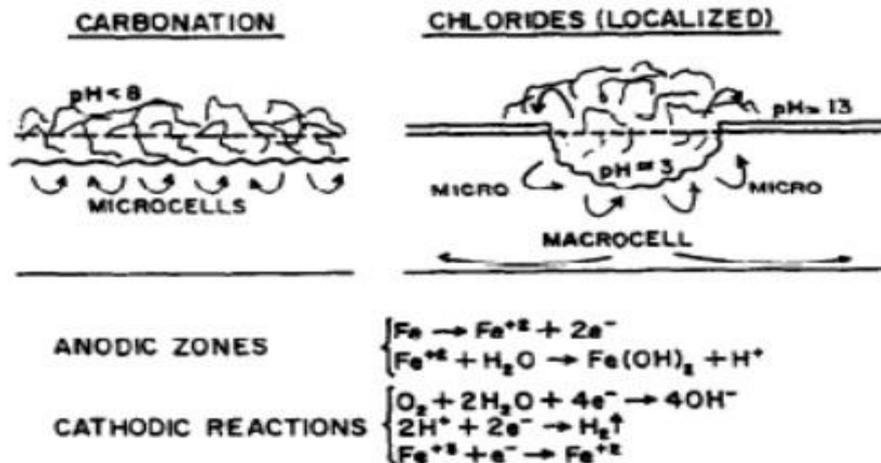


Figura 1.3 – Corrosión generalizada y localizada en armaduras de acero. Creación de micropilas y macropilas de corrosión. Fuente: “Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site”. Construction and building materials. Volumen 10, nº 5, pág. 321. (1996)

Los diagramas de Pourbaix nos dan idea del estado en el que se encuentran los metales y disoluciones, en función de los cambios en el pH y el potencial. En los gráficos nº 2 y nº 3, podemos observar los diagramas de transformación del H₂O y el Fe:

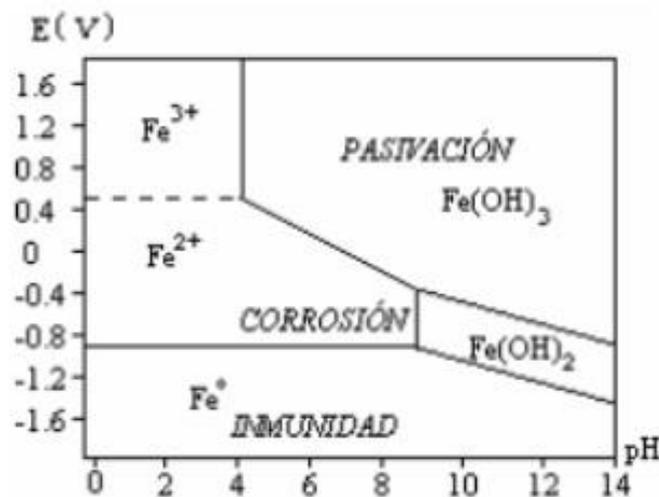


Gráfico nº 2 – Diagrama de Pourbaix del Fe a 25°C. Fuente: Secretaría de comunicaciones y transportes del Instituto Mexicano del Transporte. Publicación técnica nº 182. (2001).

En el gráfico nº 2 se definen las zonas en las que las especies químicas pueden estar como sólidos insolubles (Fe, Fe(OH)₂yFe(OH)₃)y solubles, como iones (Fe²⁺yFe⁺³).

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

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

Las líneas inclinadas dividen zonas de reacciones redox donde intervienen protones. Por lo tanto, el potencial depende del pH de la disolución (Raharinaivo, 1986).

La distribución de zonas es la siguiente (Moreno, 2001):

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

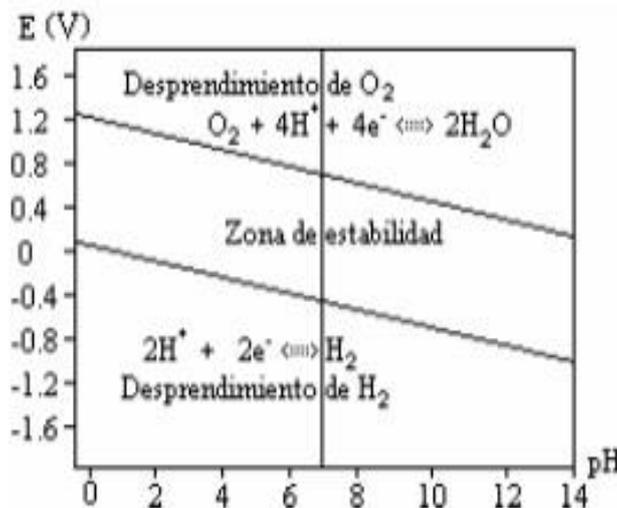
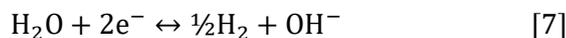


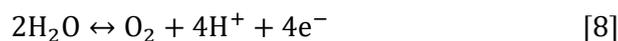
Gráfico nº 3– Diagrama de Pourbaix del agua a 25°C. Fuente: Secretaría de comunicaciones y transportes del Instituto Mexicano del Transporte. Publicación técnica nº 182. (2001)

En el gráfico nº 3 podemos comprobar los cambios en la composición del H₂O en función del potencial aplicado y del pH. Las diagonales paralelas limitan la región de pH y potencial entre los cuales el agua se mantiene como un compuesto estable.

Por debajo de la línea inferior, se produce la reducción del H₂O, según la siguiente reacción:



Por encima de la línea superior, se produce la oxidación del H₂O, según la siguiente reacción:



Los diagramas de Pourbaix sólo nos ofrecen una descripción termodinámica del sistema metal/solución, sin permitir la predicción de las velocidades de reacción (Raharinaivo, 1986). Son útiles para:

- 1.- Conocer la dirección espontánea de las reacciones.
- 2.- Estimar los estados de equilibrio a los que atienden.
- 3.- Predecir los cambios ambientales que pueden evitar o reducir la corrosión.

1.3.2 Prevención de la corrosión

- Diseño adecuado de la estructura
 - La precaución más trivial es prever un buen espesor de recubrimiento. En atmósferas agresivas que es hasta 500m de la costa norte y 100m de la costa sur se debe disponer de por lo menos 5 cm de espesor.
 - Prever un régimen de exposición mínimo, en las juntas entre dos losas se debe prever un correcto sellado y un rápido drenaje de agua y esta no debe caer sobre las columnas (se reproducirá el build up del cloruro que provoca el régimen de mareas).
 - En estructuras semisumergidas, para evitar esa acumulación del cloruro, la superficie en contacto con el nivel del agua debe ser mínima.
 - Prever una protección adecuada. Lo más económico es la utilización de pinturas en base a siliconas que sellan la superficie del hormigón la cual es efectiva, aunque actualmente no hay experiencia acerca de su duración.

- Diseño del hormigón.
 - Relación a/c mínima. Recurrir a aditivos fluidificantes y a vibrado.
 - Selección de los áridos, la piedra no debe ser porosa, aunque generalmente lo es, por lo que se realiza el encapsulamiento de los áridos reciclados para la disminución de la absorción.
 - Extremar las precauciones para asegurar un óptimo curado del hormigón.

Cuando no se efectúa una prevención se desatan efectos de la corrosión de la armadura en el hormigón armado:

1. Reducción de la sección transversal de las barras y por tanto disminución de la capacidad resistente del elemento. Estos efectos perjudican la durabilidad de las estructuras de hormigón armado.
2. Generación de manchas de color pardo-rojizas provocadas por distintos compuestos de la corrosión.
3. Formación de fisuras, agrietamiento y hasta delaminación en casos avanzados.
4. Disminución de la adherencia hormigón-acero, por lo que se va perdiendo la capacidad de transferir las tensiones de tracción del hormigón al acero.

1.4 Métodos para evaluar el grado de corrosión

1.4.1 Ensayos comunes para evaluar el grado de corrosión

Se han desarrollado diversas técnicas analíticas de ensayo para poder emitir criterios acerca de la calidad y avance de este efecto que corroe al acero de refuerzo. A continuación, se muestran algunas de las técnicas empleadas.

Tabla 1.1 Ensayos más comunes para determinar la corrosión

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

1.4.2 Método de la Macroelda

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

Se estructura un protocolo para determinar bajo condiciones ambientales controladas y en tiempo real, la corrosión del acero de refuerzo en los especímenes de hormigón armado con áridos reciclados completamente carbonatados. En lo cual se propone la simulación de carbonatación total de los diferentes especímenes donde a partir de un flujo energético entre las varillas de acero inoxidable y de acero negro que estarán embebidas en el hormigón tendremos constancia del tiempo que se demora en corroerse el acero, y que influencia tienen los distintos materiales componentes del hormigón, así como las distintas distancias de recubrimiento.

En el caso de un ambiente no uniforme, como es el caso del hormigón parcialmente carbonatado, el estado electroquímico de la barra de acero puede variar de un punto a otro, ocurriendo la despasivación de algunas áreas, mientras que otras permanecen dentro del rango de pasivación. Debido a que, en el hormigón armado, las barras de acero están eléctricamente conectadas, algunas áreas activas y pasivas pueden intercambiar electrones producidos por la reacción anódica local. Este fenómeno corresponde a una corrosión a nivel de macroceldas. Físicamente, los sistemas a base de macroceldas, pueden ser definidos como el acoplamiento electroquímico de sistemas de microceldas activas y pasivas, siendo posible para los dos sistemas el intercambio de electrones a través de la red metálica (SOHAIL, 2013).

1.4.2.1 Modelo de corrosión de Microceldas

Como se muestra en la Figura 1.4, la denominada corrosión de las microceldas indica el fenómeno de corrosión de las varillas de refuerzo en el hormigón, donde la corriente catódica del hormigón a la varilla de refuerzo sea igual a la corriente anódica de la varilla de refuerzo al hormigón, en cada elemento, a todo lo largo de la varilla de refuerzo (Tsuyoshi Maruya 2007). Por lo tanto, para cada elemento a lo largo de la varilla de refuerzo, un ánodo y un cátodo existen simultáneamente.

1.4.2.2 Modelo de corrosión de Macroceldas

Se considera que el circuito macrocelda es un circuito de corrosión que se produce entre el ánodo y el cátodo a cierta distancia uno del otro. La velocidad de corrosión del acero en el hormigón aumenta principalmente debido a la formación de circuitos macrocelulares. A diferencia del proceso de corrosión del acero, que causa la subestimación de la tasa de corrosión justo por la intersección de las curvas de polarización anódica y catódica (Tsuyoshi Maruya 2007).

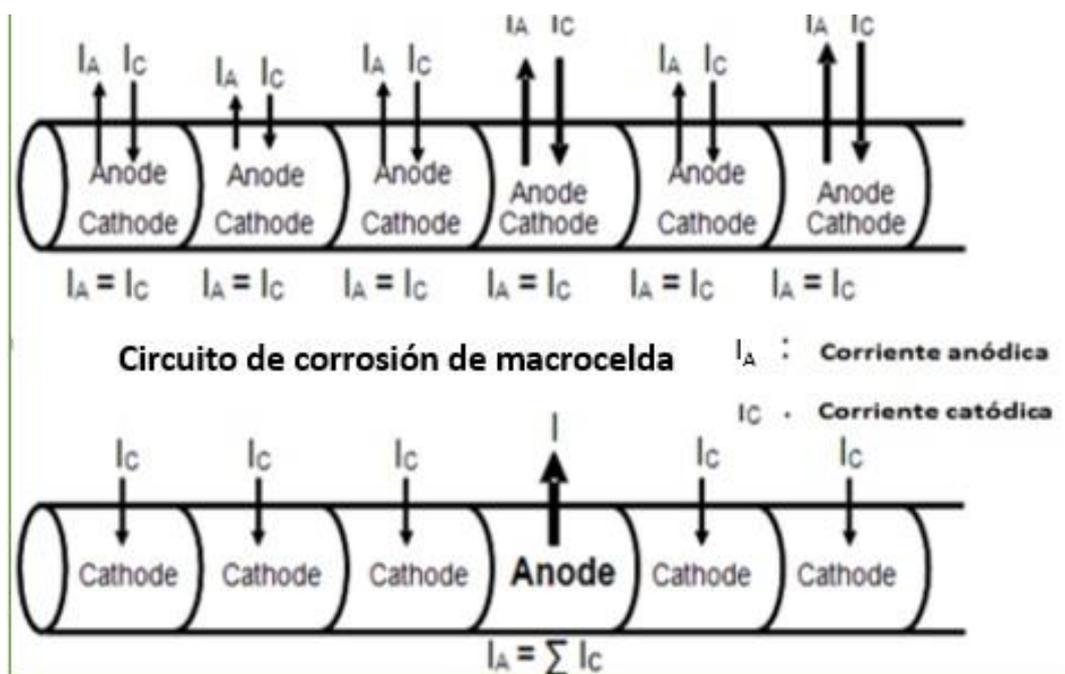


Fig.1.4. Modelo de circuitos de corrosión de Microceldas y Macroceldas (Elsener et al., 2003).

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

electrodos separados, la polarización de activación es indispensable para generar la energía de activación esencial requerida para las reacciones de corrosión. Así, como muestra la Fig.1.4, la corrosión de células macro está relacionada con la formación de un circuito de Macrocela debido a la separación entre el ánodo y el cátodo a lo largo de la barra de refuerzo (Tsuyoshi Maruya 2007).

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

Conclusiones Parciales Capítulo I

1. Los hormigones con áridos reciclados conllevan a un aumento en la consistencia del hormigón debido a la elevada absorción que presentan dichos áridos por la presencia de mortero adherido en ellos.
2. Los hormigones con áridos reciclados al poseer una mayor relación a/c tiene sus efectos negativos como un mayor índice de poros lo cual es más propenso a ataques químicos (carbonatación), abrasión y cualquier otro proceso de deterioro lo que puede afectar su forma original, calidad y vida útil.
3. La carbonatación es un proceso de penetración del CO_2 atmosférico y el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) presente en la pasta de cemento, donde penetra a través de la porosidad del hormigón, neutralizando su alcalinidad con una disminución del pH a un 7-8 donde la capa de óxido de las barras no es estable y se produce el fenómeno de la corrosión, provocando en el acero una disminución de su diámetro inicial.
4. Los métodos existentes en su mayoría para determinar el grado de corrosión del acero son destructivos y son de difícil interpretación en los resultados, por lo que el método de la Macrocelda es no destructivo y resulta viable para determinar el fenómeno de la corrosión en tiempo real y condiciones ambientales controladas.

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macrocela para la evaluación de la corrosión de especímenes de hormigón armado con áridos reciclados, fabricados con cemento P-35

Se expone en este capítulo el protocolo experimental para la obtención de los resultados para evaluar en tiempo real la corrosión del acero de refuerzo en hormigones con áridos reciclados completamente carbonatados con cemento P-35. Para su realización se describen las características de los materiales constituyentes, equipos e instrumentos empleados y la metodología desarrollada en el ensayo de la Macrocela.

Se fabricarán especímenes de hormigón reforzados en el laboratorio de materiales de la Facultad de Construcciones de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

La selección de la fuente de origen de los escombros que se emplearán en la investigación es decisiva para determinar las propiedades físicas y mecánicas. Los áridos provenientes de dichos escombros si no se le realiza una buena caracterización podrían falsear los resultados de la investigación y esto a su vez influir en los resultados finales de la investigación.

2.1 Diseño experimental de mezclas de hormigón para especímenes de hormigón armado con áridos reciclados

En la elaboración de hormigones partiremos previamente de un diseño experimental que evaluará la influencia de la absorción de los áridos reciclados. Se producirá dos tipos de hormigón, uno con árido reciclado encapsulado y otro con áridos reciclados sin encapsular. El cemento utilizado es P-35 para analizar las propiedades anticorrosivas del mismo con áridos reciclados, luego del análisis de los hormigones, para lograrlo se siguieron varias acciones:

1. Preparación de los áridos reciclados realizando la encapsulación de la fracción de 5-9 mm.
2. Preparación de las celdas de ensayos de carbonatación con concentración de CO_2 al 4%.
3. Determinación experimental del tiempo para lograr la carbonatación hasta la barra de acero.
4. Producción de los diferentes especímenes de hormigón reforzado en probetas cúbicas de 150 mm x 150 mm x 150 mm para determinar la corrosión y demás especímenes para determinar resistencia mecánica, permeabilidad al aire y resistividad.

5. Preparación de las series de hormigón para medir la corrosión habiendo 2 especímenes de áridos reciclados encapsulados carbonatados y 2 sin carbonatar; 2 especímenes de áridos reciclados sin encapsular carbonatados y 2 sin carbonatar.
6. Curado, conservación y preparación de los especímenes de hormigón con áridos reciclados encapsulados y sin encapsular.

2.2 Caracterización de los materiales constituyentes del hormigón

2.2.1 Áridos reciclados

Para lograr una correcta caracterización de los áridos reciclados a utilizar en la fabricación de hormigón se deben realizar los ensayos de laboratorios correspondientes apoyándonos en las normas cubanas. Estos ensayos se muestran en la tabla 2.1

Tabla 2.1: Ensayos a realizar a los áridos y sus respectivas normas

Ensayos	Normas
Análisis granulométrico	(NC_178, 2002)
Peso Volumétrico	(NC_181, 2002)
Peso Específico	(NC_186, 2002)
Absorción de agua	(NC_187, 2002)
Tamiz 200	(NC_182, 2002)

Tabla 2.2: Características de áridos naturales fracción 0-5 mm

Especificaciones (NC_251, 2013)		Según	Ensayos realizados		
9,5	100	(g/cm ³)	Peso Específico	Corriente	2.40
4,75	90-100		Saturado	2.48	
2,36	70-100		Aparente	2.61	
1,18	45-80	(Kg/m ³)	Peso Volumétrico	Suelto	1430.104
600 μ	25-60		Compactado	1614.854	
300 μ	10-30	Absorción (%)	3.33		
150 μ	2-10	Tamiz 200 (%)	4.3		
Módulo de finura			3.42		

Tabla 2.3: Características de áridos reciclados fracción 0-5 mm

Especificaciones resultados			según	Ensayos realizados		
Tamiz	Retenido(g)	Pasado (%)				
9,5	0.0	100	Peso Específico (g/cm ³)	Corriente	1.83	
4,75	39.2	93.32		Saturado	2.13	
2,36	172.4	63.92		Aparente	2.62	
1,18	83.8	49.62	Peso Volumétrico (Kg/m ³)	Suelto	1083,12	
600 μ	92.4	33.87		Compactado	1168.17	
300 μ	73.7	21.3	Absorción (%)	16.8		

150 μ	52.2	12.4	Tamiz 200 (%)	4.66
Fondo	71.8			

Tabla 2.4: Características de áridos naturales fracción 5-9 mm

Especificaciones Según (NC_251, 2013)		Ensayos realizados		
12,5	100	Peso Específico (g/cm³)	Corriente	2.39
9,5	85-100		Saturado	2.46
4,75	15-35		Aparente	2.6
2,36	0-10	Peso Volumétrico (Kg/m³)	Suelto	1401.910
1,18	0-5		Compactado	1577.21
		Absorción (%)	3.03	
		Tamiz 200 (%)	5.3	
Módulo de finura			3.42	

Tabla 2.5: Características de áridos reciclados fracción 5-9 mm

Especificaciones según resultados			Ensayos realizados		
Tamiz	Retenido(g)	Pasado (%)			
12.5	0.0	100	Peso Específico (g/cm³)	Corriente	2.20
9.5	120.9	90.59		Saturado	2.37
4.75	1099.5	4.98		Aparente	2.65
2.36	44.0	1.56	Peso Volumétrico (Kg/m³)	Suelto	1136.38
1.18	7.3	0.99		Compactado	1213.67
Fondo	12.6		Absorción (%)	7.79	
			Tamiz 200 (%)	0.77	

Tabla 2.6: Características de áridos naturales fracción 9-19 mm

Especificaciones Según (NC_251, 2013)		Ensayos realizados		
25	100	Peso Específico (g/cm³)	Corriente	2.44
19,0	90-100		Saturado	2.51
12,5	20-55		Aparente	2.6
9,5	0-15	Peso Volumétrico (Kg/m³)	Suelto	1452.801
4,75	0-5		Compactado	1579.927

	Absorción (%)	3.03
	Tamiz 200 (%)	2.4

Tabla 2.7: Características de áridos reciclados fracción 9-19 mm

Especificaciones según resultados			Ensayos realizados		
Tamiz	Retenido(g)	Pasado (%)			
25.4	0.0	100	Peso Específico (g/cm³)	Corriente	2.21
19.0	0.0	100		Saturado	2.36
12.5	854.20	34.52		Aparente	2.61
9.5	389.10	4.69	Peso Volumétrico (Kg/m³)	Suelto	1151.70
4.75	51.80	0.72		Compactado	1191.97
Fondo	9.80		Absorción (%)	6.93	
			Tamiz 200 (%)	0.71	

- **Proceso de encapsulación de la fracción de 5-9 mm**

El procedimiento de encapsulación se realizó en uno de los talleres de la facultad de Ingeniería Mecánica en la UCLV con un equipo llamado paletizadora (figura 2.1). Se humedeció la superficie del tambor giratorio que el cual posee un ángulo de 30° respecto al eje horizontal. La fracción utilizada fue la intermedia de (5-9 mm) que fue colocado y rociado con agua hasta que estuviera pre-saturado (húmedo superficialmente) para facilitar la adhesión del cemento PP-35 al árido. Seguidamente se comenzó a agregar cemento pasado por el tamiz 600 para evitar la caída de granos mayores y el agua hasta que el árido estuviera recubierto. Producto del proceso los granos del áridos reciclados quedaron recubiertos con una capa de cemento de algunos nanómetros.



Figura 2.1: Paletizadora.

Figura 2.2: Áridos encapsulados.

Figura 2.3: Curado.

Seguidamente de este proceso de encapsulación es retirado del mezclador y colocado sobre mantas y cubiertos con toallas húmedas (figura 2.3), las cuales tienen que ser humedecidas durante un período de 7 días para un curado satisfactorio.

2.2.2 Cemento P-35

Tabla 2.8: Requisitos y métodos de ensayo para Cemento Portland P-35

Índice	Requisitos	UM	P-35	Método de ensayo
Físicos	Superficie Específica Blaine (min.)	cm ² /g	2800	NC EN 196-6
	Tiempo fraguado inicial (mín.)	Min	45	(NC_524, 2015)
	Tiempo fraguado final (mín.)	H	10	
	Estabilidad de volumen por Le Chatelier (máx.)	mm	10	(NC_504, 2013)
Mecánicos	Resistencia a la compresión (mín.) 3 días	MPa	17	(NC_506, 2013)
	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, 2007)
	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 2.2. de la (NC_95, 2011)

Ensayos realizados al cemento P- 35. Fábrica de Cementos Carlos Marx, Cienfuegos.

Tabla 2.9: Cemento P- 35. Resultado de Ensayos Mecánicos.

	Ensayos Mecánicos		
	3 días	7 días	28 días
Resistencia a compresión (Mpa)	23,5	31,6	46,2
Según NC 96: 2011	17	25	35

Tabla 2.10: Cemento P- 35. Resultado de Ensayos Físicos.

Ensayos Físicos		
Ensayos	Resultados	Según (NC_96, 2011)
Superficie Específica (cm ² /g)	3671	2800
Tiempo de Fraguado Inicial (h)	3,67	0,45
Tiempo de Fraguado Final (h)	5,79	10

Tabla 2.11: Cemento P- 35. Resultado de Ensayos Químicos.

Ensayos Químicos		
Ensayos	Resultados	Según (NC_96, 2011)
Pérdida por ignición (max.) %	3,67	4,0
Residuos insoluble (max.) %	5,79	4,0
Trióxido de Azufre (max.) %	0,72	3,5

2.2.3 Agua de amasado

Se empleó agua potable según la (NC_353, 2004)“Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones”. Esta norma específica que se considera apta para el amasado y curado de los hormigones y morteros el agua fresca potable, proveniente de acueductos y de otras fuentes de abastecimiento, cuya utilización esté adecuadamente avalada por resultados prácticos, con materiales análogos y uso semejante.

2.2.4 Aditivo

El Aditivo a utilizar es Dynamon Sx-32, solución acuosa al 22.1% de polímeros acrílicos, exenta de formaldehído, capaz de dispersar eficazmente los gránulos del cemento con componentes secundarios que mejoran notablemente la cohesión y la facilidad de bombeo del hormigón. Además de ser un superplastificante reductor de agua de alto rango de última generación; se utiliza al 1% del peso del cemento, es un producto elaborado con la participación de Cuba e Italia. La acción defloculante del Dynamon Sx-32 puede ser utilizada de tres modos:

1. Para reducir sólo el agua respecto al hormigón aditivado, manteniendo la consistencia: se obtiene, como consecuencia, un aumento de la resistencia mecánica, reducción de la permeabilidad y un incremento de la durabilidad.
2. Para incrementar la consistencia respecto al hormigón no aditivado de buena calidad prestacional (resistencia mecánica, impermeabilidad, durabilidad), pero de difícil puesta en obra (hormigón seco o plástico).
3. Para reducir tanto el agua como el cemento (en igual proporciones) dejando inalteradas tanto la relación agua/cemento (y por lo tanto las prestaciones) como la consistencia, respecto al hormigón no aditivado: se registran en tal caso ventajas técnicas por una menor retracción higrométrica, una menor deformación viscosa, un menor desarrollo del calor de hidratación, etc. Esta última característica es importante, particularmente, para hormigones con una elevada dosificación de cemento (>350 kg/m³).



Figura 2.4: Aditivo Dynamon SX-32”

Tabla 2.12: “Características 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_2O) equivalente (%)	<3,5
Clasificación	Superfluidificante

2.3 Acero

Se emplearon dos tipos de acero, el acero negro, barra corrugada de 12 mm de diámetro y acero inoxidable, de 15 mm de diámetro

2.3.1 Acero inoxidable

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



Figura 2.5: Acero inoxidable

2.3.2 Acero negro

Es la denominación que comúnmente se le da en ingeniería metalúrgica a una aleación de hierro con una cantidad de carbono variable entre el 0,1 y el 2,0% en peso de su composición. Si la aleación posee una concentración de carbono mayor al 2,0% se producen fundiciones que, en oposición al acero, son quebradizas y no es posible forjarlas, sino que deben ser moldeadas. El acero conserva las características metálicas del hierro en estado puro, pero la adición de carbono y de otros elementos tanto metálicos como no metálicos mejora sus propiedades físico-químicas (Bello).

Tabla 2.13: Parámetros y dimensiones principales del acero. (NC_752, 2010)

Parámetros y dimensiones principales del acero (NC 752:2010)												
No. Designación de la barra	Peso lineal (masa)Kg/m	Dimensiones Nominales			Requisitos Nominales de la Corruga y Nervio (mm)							
		Diámetro (dn)		Área de la sección circular (An)	Espaciamento promedio (t)		Altura min promedio (h)	Altura del nervio (a)		Grueso del nervio (b)		Max separación (cuerda de 12.5% del
		mm	pulg	mm ²	Min	Max		Min	Max	Min	Max	
13(4)	0.994	12.7	(1/2)	129	6.3	8.9	0.7	0.63	1.77	1.01	2.03	4.9

El acero de barras comerciales de 9 metros las cuales fueron cortadas en partes de 150 mm las cuales fueron rebajadas a 147 mm para facilitar la colocación en los moldes cúbicos de 150 mm x 150 mm x 150 mm. Se realizó un trabajo de preparación dado que estaban oxidados los aceros el cual consistió en:

1. Colocación del acero en desecador con líquido desoxidante y se mantuvo por 2 días (figura 2.6).
2. Extracción de la capa de óxido con un cepillo de alambre.
3. Se enjuagó en agua para por un corto período de tiempo para eliminar el oxide (figura 2.7).
4. Colocación del acero en alcohol isopropylque 99.9% para eliminar el agua restante del paso anterior.
5. Colocación de las barras de acero en un desecador para mantenerlo fuera del ambiente para evitar la corrosión del mismo (figura 2.8).



Figuras 2.6 Acero en desecador con líquido desoxidante



Figura 2.7 Enjuague del acero



Figura 2.8 Protección del acero

2.4 Fabricación de hormigones

2.4.1 Dosificación de las mezclas de hormigón empleadas

Las dosificaciones elegidas para los hormigones de esta investigación fueron diseñadas por el método de Toufar.

El método Toufar es un programa para diseñar mezclas de hormigón hecho por Robert Day. Las bases de este método son las características de los áridos utilizados, es decir: granulometría, peso volumétrico, peso específico, absorción y humedad. Además, se debe añadir el valor de la relación a/c deseado, así como la densidad del cemento y otras propiedades de los materiales utilizado. Con el diámetro característico del árido, el “packing factor” y un cálculo de la combinación óptima de los áridos, se resulta la proporción óptima de la mezcla de hormigón.

Tabla 2.14: Dosificación gravimétrica (kg/m^3) de hormigón con P-35 con áridos reciclados encapsulados y sin encapsular.

$f'c$ [Mpa]		35.0
Relación a/c		0.45
Cantidad	[kg/m^3]	1
Cemento	[kg]	384
Aditivo SX-32	[kg]	1.344
A. fino	[kg]	628
A. intermedio	[kg]	425
A. grueso	[kg]	402
Agua	[kg]	173

2.4.2 Producción de hormigón

Tabla 2.15 Producción de hormigón

Tipo de árido	Tipo de cemento	Resistencia a la compresión		Profundidad de carbonatación	Macro celda	
		100x100x100 (mm)	100x100x100 (mm)	150x150x150 (mm)	150x150x150 (mm)	
		7 días	28 días	3 o 7 días	Completamente Carbonatada	Sin Carbonatar
Áridos reciclado sin encapsular	P-35	3	3	3	2	2
Árido reciclado con encapsulación	P-35	3	3	3	2	2
Total		6	6	6	4	4
Volumen (litros)		6	6	25	15	15
Volumen Total		67				

El hormigón se fabricó en el laboratorio de materiales del CIDEM en la facultad de Construcciones de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas en una mezcladora de eje horizontal. Las mezclas fueron realizadas todas siguiendo el mismo orden. Se vertió en la mezcladora el árido grueso, el árido intermedio, el árido fino y el agua para presaturar (es 20% del agua de la mezcla más la diferencia entre la absorción y la humedad que tiene el material), se homogenizó y se dejó reposar 10 minutos, se procedió de esta manera ya que los áridos reciclados presentan una elevada absorción de agua. Seguidamente se le agregó el cemento y se homogenizó. Después se añadió la porción de agua de mezclado (80% del agua de la mezcla) con el aditivo en el menor tiempo posible desde la puesta en marcha de la mezcladora. Se prosigue con una prueba de asentamiento mediante el cono de Abrams según (NC_174, 2002)

2.4.3 Moldes empleados

Para la evaluación de los especímenes se emplearon moldes cúbicos de 100 x 100 x 100 mm y moldes cúbicos de 150 x 150 x 150 mm respectivamente (figura 2.7). Se les agregó el hormigón manualmente a razón de dos capas iguales, para ser compactado con un vibrador de inmersión de 25 mm de diámetro (no mayor a 40 mm) y de una frecuencia mayor o igual a 150 Hz durante aproximadamente 5 segundos, según lo establecido en ASTM C 31/C 31M – 03^a. El proceso de desmolde se realizó a las 24 horas, para ser utilizados en otros hormigones.



Figura 2.9: Moldes cúbicos de 100x100x100 mm y 150x150x150 mm

2.4.4 Llenado de probetas, compactación y conservación

Se ha tomado como referencia la (NC_221, 2002). Una vez amasado, debemos introducir el hormigón en los moldes. Previamente al llenado de las probetas, las paredes y bases de los moldes se impregnan un aceite desmoldante para facilitar su posterior desmolde.

Una vez realizado el hormigón se introduce en los moldes en 2 capas las cuales se compactan hasta que aflore la pasta de mortero con vibrador de inmersión, luego se engrasa la superficie de las probetas para evitar rugosidades en la superficie de las mismas.

Las probetas se conservan durante 24 horas en los moldes. Transcurrido ese tiempo se extraen de los moldes y se marcan de forma que no se alteren las superficies que han de estar en contacto con los platos de la prensa de ensayo. Posteriormente las probetas se transportan a la cámara de curado, donde se almacenan hasta la realización de los ensayos de compresión a 7 y 28 días.



Figura 2.10: Conservación y curado

2.5 Ensayos al hormigón en estado fresco

2.5.1 Docilidad

Propiedad indispensable de toda mezcla de hormigón en estado fresco es su docilidad (o laborabilidad), entendiéndose como tal la aptitud del material para dejarse fabricar, transportar, colocar y compactar, sin que se presenten afectaciones notables en dichas actividades. Puede señalarse que la docilidad del hormigón depende de dos factores fundamentales:

- Las condiciones de fabricación y puesta en obra.
- La configuración y dimensiones del molde, así como la cuantía y distribución del acero de refuerzo.

Las condiciones de fabricación y puesta en obra se refieren a los medios y condiciones con que se cuente para el amasado, trasiego, colocación y, sobre todo, para la compactación del hormigón (Rodríguez, 2012)

2.5.2 Consistencia

Consistencia del hormigón se entiende como el grado de deformabilidad del mismo, existen varios factores que modifican la consistencia del hormigón como el contenido de agua en la masa del material, contenido de finos, tamaño máximo del árido, forma y granulometría de los áridos, proporciones de la mezcla, presencia de aditivos, etc.

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

2.5.2.1 Cono de Abrams

El método desarrollado para la medición de la consistencia del hormigón utilizado fue el Cono de Abrams Figura 2.11. Este método se basa en la medición del asentamiento (slump) o escurrimiento que sufre una masa de hormigón que ha sido previamente conformada con un molde de forma tronco-cónica, denominado cono de Abrams. Para poner en práctica el procedimiento se siguen los pasos siguientes:

- 1- Se humedece el molde y se coloca sobre una superficie ligeramente humedecida también.
- 2- Se llena el molde en tres capas iguales, compactándose con 25 golpes de varilla compactadora al final de cada capa.
- 3- Al terminar de compactarse la última capa se enraza con la varilla de compactación.

4- Se retira el cono verticalmente.

5- Se mide el asentamiento de la mezcla con respecto al borde superior del cono (NC_174, 2002). Figura 2.12



Figura 2.11: Cono de Abrams



Figura 2.12: Prueba de asentamiento

Tabla 2.16: Consistencia del hormigón en función del asentamiento por el Cono de Abrams.

Tipo	Valoración cualitativa	Asentamiento en mm
A1	Seca	10 a 40
A2	Plástica	50 a 90
A3	Blanda	100 a 150
A4	Fluida	160 a 210
A5	Muy fluida	≥ 220

2.6 Ensayos al hormigón en estado endurecido

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

El comportamiento mecánico de los hormigones fabricados se evaluó mediante los ensayos a compresión realizados en el laboratorio de materiales de la Facultad de Construcciones de la UCLV. Para ello se tomaron 3 probetas cúbicas de 100 mm x 100 mm x 100 mm por cada serie y por cada mezcla para ser ensayadas a los 7 y 28 días resultando un total de 6 especímenes para el hormigón producido con áridos reciclados encapsulados y 6 para el hormigón producido con áridos reciclados sin encapsular. Los requerimientos del ensayo a compresión se encuentran en (NC_724, 2009). Para poner en práctica el ensayo se colocaron las probetas cúbicas centradamente en el plato de la

prensa y se le aplicó una fuerza con carga continua a razón de 1 mm x minuto hasta su rotura.



Figura 2.13: Resistencia a compresión de hormigones con árido reciclado encapsulado y árido reciclado sin encapsular.

2.6.2 Resistividad a edad de 28 días

El Resipod se ha concebido para medir la resistividad eléctrica de hormigón. Se aplica una corriente a dos sondas exteriores y se mide la diferencia de potencial entre las dos sondas interiores. La corriente es transportada por iones en el líquido de los poros. La resistividad calculada depende de la distancia entre las sondas (SA, 2014).

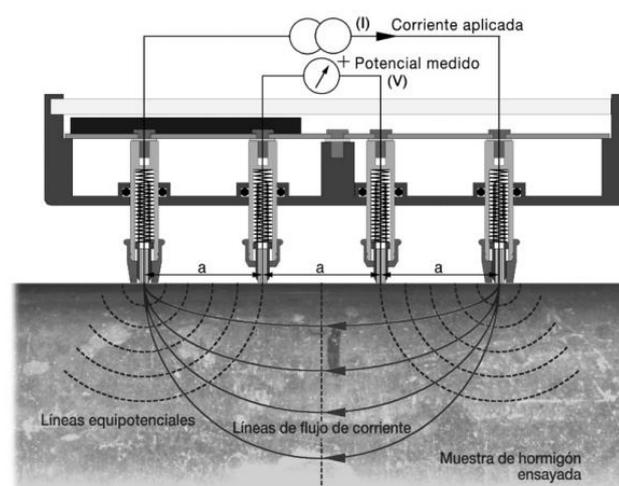


Figura 2.14: Equipo y principio del método

2.6.2.1 Preparación de la superficie de hormigón

La superficie de hormigón no deberá estar revestida de ningún recubrimiento eléctricamente aislante y debería estar limpia. La superficie no puede estar seca ya que la corriente es conducida por iones en el líquido de los poros y es necesario humedecer la superficie.

2.6.2.2 Interpretación de los resultados

Pruebas empíricas y la teoría han mostrado que la resistividad está directamente enlazada tanto con la probabilidad de corrosión a causa de la difusión de cloruro como con la velocidad de corrosión una vez que ha tenido lugar la despasivación del acero.

2.6.2.3 Estimación de la probabilidad de corrosión

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

Tabla 2.17: Probabilidad de corrosión

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

2.6.2.4 Indicación de la velocidad de corrosión

La siguiente interpretación de las mediciones de resistividad del sistema Wenner de cuatro sondas ha sido citada al referirse a acero despasivado (Langford and Broomfield, 1987).

Tabla 2.18: Velocidad de corrosión.

Resultado	Probabilidad	2.6.3
> 20 kΩ cm	Velocidad de corrosión baja	
> 10 -20 kΩ cm	Velocidad de corrosión baja a moderada	
5-10 kΩ cm	Velocidad de corrosión alta	
< 5 kΩ cm	Velocidad de corrosión muy alta	

Permeabilidad al aire a 28 días

"No existe un método de aceptación general para caracterizar la estructura de poros del hormigón y relacionarla con su durabilidad. Sin embargo, diversas investigaciones han indicado que la permeabilidad del hormigón, al aire o al agua, es una excelente medida de su resistencia al ingreso de medios agresivos en el estado gaseoso o líquido y así constituye una medida de la durabilidad potencial de un hormigón dado." (Ltd, 2015).

La Norma Suiza SIA 262:2003 establece: "La impermeabilidad del hormigón de recubrimiento debe verificarse mediante ensayos de permeabilidad (p.ej. midiendo la permeabilidad al aire) aplicados sobre la estructura o sobre testigos extraídos de la misma". El *PermeaTORRTM* es un instrumento diseñado precisamente a ese fin: medir la permeabilidad al aire del hormigón de recubrimiento "in situ", de manera rápida, repetible, confiable y no destructiva. Los resultados que brinda el método se correlacionan bien con otros ensayos de durabilidad como Permeabilidad a Cloruros (ASTM C1202), Carbonatación, Permeabilidad al aire (Cembureau), Succión Capilar, etc.

2.6.3.1 Descripción del método

El método se efectúa con la implementación del permeabilímetro de aire de doble cámara. Este equipo se emplea para la medición de la permeabilidad intrínseca al aire de hormigón de recubrimiento (kT) y de acuerdo con los resultados obtenidos se establece una valoración de la calidad del recubrimiento (Artola, 2014).

2.6.3.2 Interpretación de los resultados

Tabla 2.19: Clases de Permeabilidad

Clases de Permeabilidad en base a kT		
Clase	kT($10^{-16}m^2$)	Permeabilidad
PK1	<0.01	Muy Baja
PK2	0.01-0.1	Baja
PK3	0.1-1.0	Moderada
PK4	1.0-10	Alta
PK5	10-100	Muy Alta

Fuente: (Luis Ebensperger 2010)

2.6.5 Profundidad de carbonatación

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

Después de soplar todo el polvo residual del espécimen o del substrato, se pulveriza una solución de 1% de fenolftaleína en alcohol sobre el hormigón. Las áreas carbonatadas del hormigón no cambiarán de color, mientras que las áreas con un pH mayor de 9 a 9.5 adquirirán un color rosado brillante (figura 2.15). Este cambio muy apreciable de color muestra cuán profundamente ha progresado el "frente" de carbonatación dentro del hormigón.



Figura 2.16: Ensayo de profundidad de frente carbonatado con aplicación de fenolftaleína. Fuente: (NC_355, 2004)

2.7 Método experimental

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

2.7.1 Protocolo Macrocela. Metodología empleada

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

Principio de funcionamiento del método de la Macrocela (C.M. HANSSON 2006) :

- Lograr una completa carbonatación de la muestra en una cámara, suministrando CO_2 al 4% hasta lograr una profundidad de carbonatación de hasta 50 mm.
- Circuito Macrocela, circuito de corrosión que se produce entre el ánodo y el cátodo a cierta distancia uno del otro.
- Modelo de corrosión de macrocélulas, es modelo para calcular el potencial de media celda y la densidad de corriente dentro del circuito recién formado entre dos elementos a lo largo de las barras de refuerzo, calculando la caída óhmica. (figura 2.17).
- Interacción entre electrodos separados, se supone que no hay interacción entre electrodos separados, sin embargo, una vez que se inicia la corrosión, debe haber una interacción entre electrodos separados debido a la existencia de polarización.
- Reacciones de corrosión, una vez que se tiene en cuenta la interacción entre electrodos separados, la polarización de activación es indispensable para generar la energía de activación esencial requerida para las reacciones de corrosión.

Este método experimental nos permite precisar el tiempo que demora en desencadenarse la corrosión del acero embebido en el hormigón con áridos reciclados a partir de las diferencias de corrientes que se originan entre el acero inoxidable y el acero negro. Las cuales se miden a partir de un voltímetro.

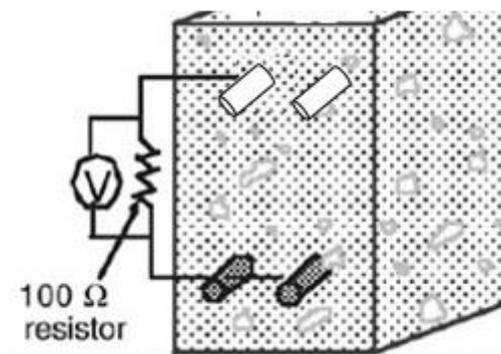


Figura 2.17: Medición de corriente.

2.7.2 Equipos y materiales empleados para carbonatación

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

2.7.3 Equipos y materiales empleados para evaluación de la corrosión

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

2.7.4 Medios de protección utilizados

Resulta adecuado el empleo de diversos medios tales como guantes de goma y protectores de las vías respiratorias para evitar inhalar CO₂, y llevar a cabo el proceso en el aire libre para en caso de alguna fuga, evitar accidentes.

2.8 Ensayo de la Macroelda. Procedimiento y desarrollo

1. Preparación de los moldes, con listones de madera incluida para sostener las barras de acero, (figura 2.18).
2. Humedecer la superficie de los especímenes con un atomizador con agua destilada para garantizar el medio húmedo dentro del hormigón y así acelerar el proceso de corrosión.
3. Medir durante dos meses, al menos 2 veces al día. Este es el tiempo ideal para llevar a cabo este ensayo, pero solo se reportarán mediciones por 96 horas.



Figura 2.18 Moldes con madera incluida para sostener barras de acero.

Capítulo III Análisis de resultados obtenidos de los especímenes de hormigón fabricados con áridos reciclados

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados de los ensayos realizados en el hormigón, los cuales fueron expuesto en el capítulo anterior. Donde se realiza la comparación de los resultados obtenidos con los áridos reciclados sin encapsulación y los áridos reciclados con encapsulación, respecto a el caso del hormigón en estado fresco, evaluaremos la consistencia y el hormigón en estado endurecido resistencia físico-mecánica, resistividad, permeabilidad al aire y el método de la Macrocela.

3.1 Ensayos del hormigón en estado fresco

3.1.1 Asentamiento



Figura 3.1 Cono de Abrams.

Tabla 3.1: Resultado de consistencia.

Tipo de árido	Asentamiento (mm)
Sin encapsulación	250
Con encapsulación	240
<p>Análisis de los resultados: Como se puede apreciar ambos hormigones presentan asentamientos parecidos, por lo que se corresponde con diseño de mezcla perfectamente elaborado. Ambos hormigones presentan una consistencia muy fluida según la (NC_174, 2002) para mayores de 220 mm</p>	

3.2 Ensayos del hormigón endurecido

3.2.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión constituye uno de los principales ensayos realizados al hormigón, en cuanto este parámetro se realizó el ensayo a compresión a 2 series una con áridos reciclados sin encapsulación y otra con áridos reciclados con la encapsulación de la fracción de 5-9 mm a edades de 7 y 28 días. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 3.2: Resultados obtenidos a partir del ensayo de rotura de los cubos de 100 mm³ a los 7 y 28 días.

f'_{ck} (MPa)	f'_{ck} 7 Días	f'_{ck} 28 Días
Hormigón con áridos reciclados encapsulados	21	24
	13	27
	20	24
	20	29
	24	24
	24	30
Promedio	20	26
Hormigón con áridos reciclados sin encapsulación	16	16
	17	20
	17	22
	16	22
	17	23
	18	21
Promedio	17	21

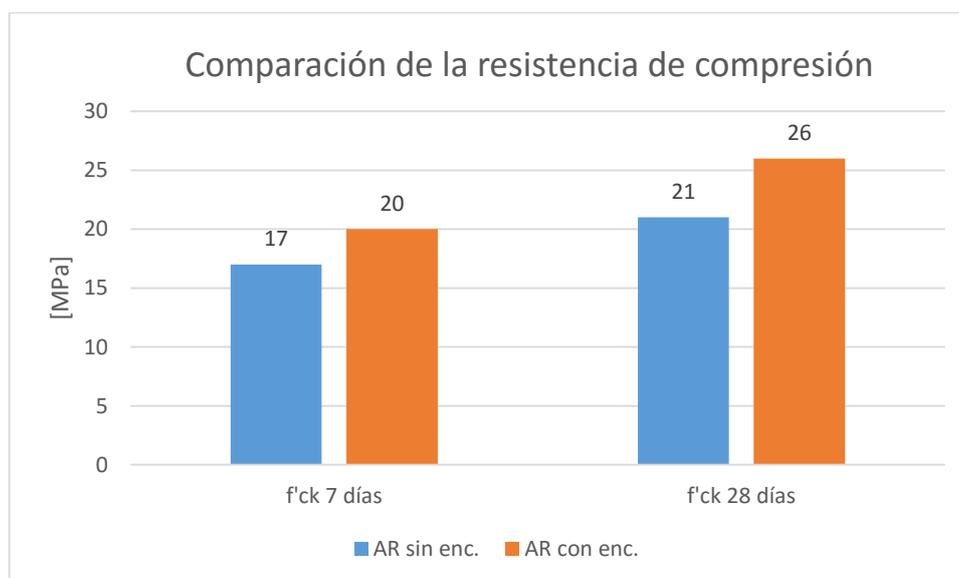


Gráfico 3.1: Resultados de compresión



Figura 3.2: Ensayo a compresión

3.2.2 Resistividad

Tabla 3.3: Resultados obtenidos a partir de los 28 días

Resistividad (Repisod Family)	Resultado 28 Días kΩcm						Resultados Promedio kΩcm	Temp. °C	Humedad %
	3.1	3.7	4.1	3.8	3.8	3.7			
Con encapsulación	3.1	3.7	4.1	3.8	3.8	3.7	3.7	25.3	52
Sin encapsulación	4.6	4.6	4.3	4.3	4.5	4.2	4.4	25.1	66

Análisis de resultados: Según el manual de operaciones del equipo Repisod Family para los valores obtenidos en los especímenes de hormigón con áridos reciclados sin encapsular y encapsulados, en el caso de ≤ 10 kΩcm existe una probabilidad de alto riesgo de corrosión y con una velocidad de corrosión muy alta dado que los valores obtenidos son < 5 kΩ cm



Figura 3.3: Resistividad hormigón con árido reciclado encapsulado.

3.2.3 Permeabilidad al aire

Tabla 3.4: Resultados obtenidos a partir de los 28 días.

Permeabilidad al aire (Permea TORRTM)	kT 28 Días cara 1	kT 28 Días cara 2	Promedio kT	Temperatura °C	Longitud (mm)
Con encapsulación	0.13	0.12	0.125	28	25
Sin encapsulación	0.32	0.34	0.33	29	34

Análisis de resultados: Según los resultados obtenidos en base a $kT(10^{-16}m^2)$ que son en el intervalo 0.1-1.0 de la permeabilidad de ambos hormigones son moderada.



Figura 3.4: Ensayo de permeabilidad realizado a hormigón con áridos reciclados encapsulados.

3.3 Método de la Mrocelda

3.3.1 Resultados previos del protocolo de la Macroelda

A continuación, se presentan los resultados preliminares del modelo de evaluación a partir del ensayo de la Macroelda.

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

Tiempo (h)	4	8	12	28	32	48	52	56	72	76	80	96
I (mA) ARSE	0,575	2,715	3,295	1,475	2,87	2,45	2,705	2,41	2,715	2,24	2,53	2,515
I (mA) ARE	0,745	4,57	1,36	2,455	2,085	1,47	1,38	1,245	1,475	1,09	1,295	1,235

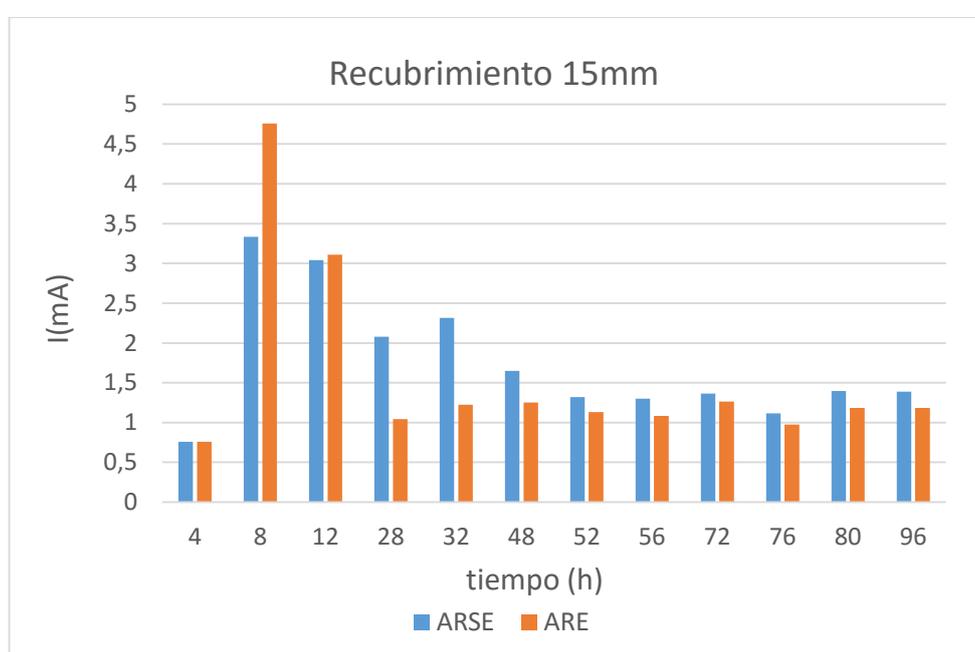


Gráfico 3.2 Valores de corriente (I) para hormigones armados, recubrimiento 15 mm.

Como se muestra en el gráfico 3.2, las primeras mediciones hasta las 48 horas resultaron valores mayores. A partir de este tiempo los valores se estabilizaron y no muestran una diferencia significativa entre los dos tipos de hormigón.

Tabla 3.6 Valores de corriente (I) para hormigones armados, recubrimiento 30 mm

Tiempo (h)	4	8	12	28	32	48	52	56	72	76	80	96
I (mA) ARSE	0,76	3,335	3,04	2,08	2,315	1,65	1,32	1,3	1,365	1,115	1,395	1,39
I (mA) ARE	0,76	4,76	3,11	1,045	1,225	1,25	1,13	1,085	1,265	0,975	1,185	1,185

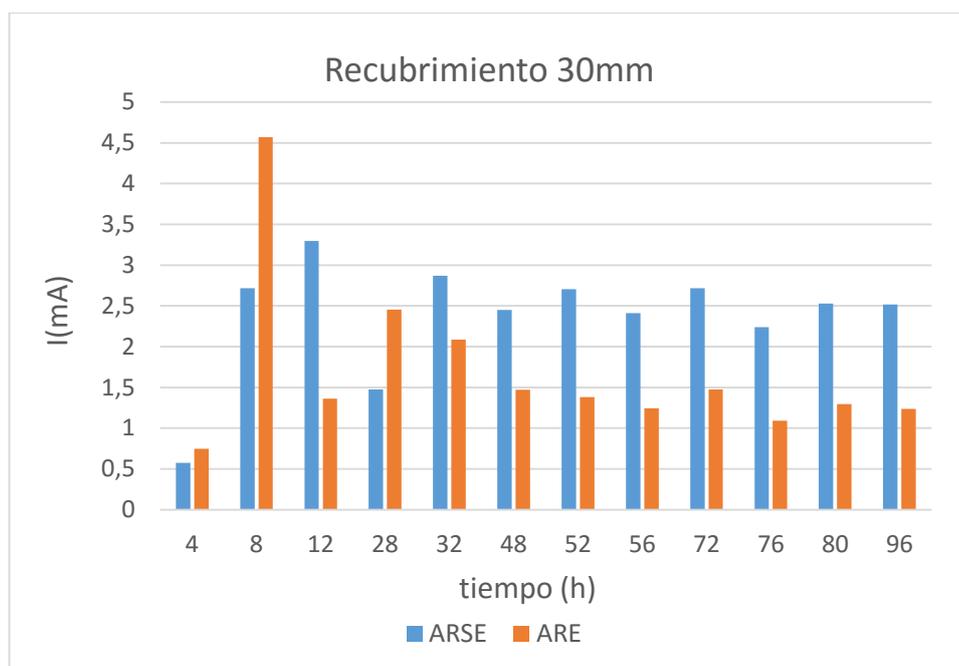


Gráfico 3.3 Valores de corriente (I) para hormigones armados, recubrimiento 30 mm.

Como se muestra en el gráfico 3.3, la mayoría de las lecturas para los hormigones elaborados con áridos sin encapsulación presentan valores mayores en comparación a los hormigones elaborados con áridos encapsulados. Esto indica un mayor grado de corrosión para el ARSE siendo este el más propenso al fenómeno de la corrosión debido a una porosidad mayor.

Comparando los dos recubrimientos diferentes de 15 mm y 30 mm se muestra que los valores de la corriente en hormigones con ARE y ARSE se mantienen parecido en el caso de 15mm y son distinto a los valores en el recubrimiento de 30 mm donde se puede observar una mejora del ARE alrededor de un 50%.

Se tiene que tener en cuenta que en el ensayo presentado hay posibles fuentes de errores, cuáles pueden ser:

- El estado de la superficie.
- Un mal contacto entre del punto de la medición y la barra de acero.
- Se trabaja con corrientes muy pequeñas las cuales presenta baja movilidad iónica.
- Los especímenes de hormigón no se mantuvieron en una cámara de curado con temperatura y humedad controlada

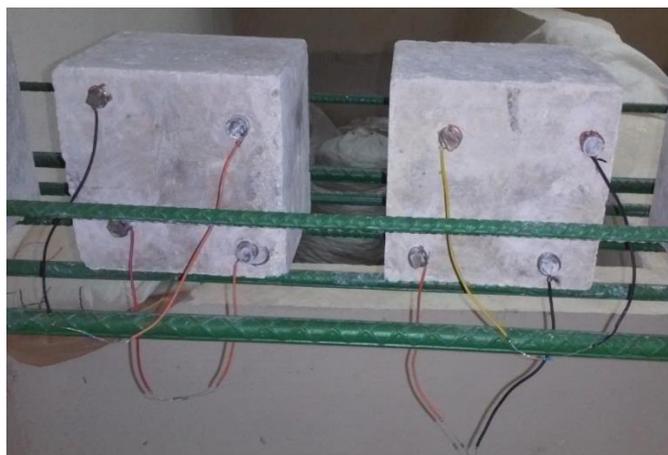


Figura 3.5: Especímenes para medir la corrosión por la Macrocela.

Conclusiones Generales

1. Los hormigones realizados con áridos encapsulados obtuvieron un incremento en la resistencia a compresión de 7 días de un 30% y a los 28 días de un 24% con respecto a los hormigones realizados con áridos reciclados sin encapsular.
2. Los ensayos realizados de durabilidad no se obtuvieron resultados favorables dando probabilidad de alto riesgo de corrosión, con una velocidad de corrosión muy alta y con una permeabilidad moderada, obteniendo mejores resultados en la permeabilidad con los hormigones realizados con áridos reciclados encapsulados.
3. Con el ensayo de la macrocelda es posible evaluar la corrosión en tiempo real y condiciones ambientales controladas, sin embargo, es necesario evitar las fuentes de errores posibles para no afectar los resultados de la investigación.
4. En el punto de vista de la Macrocelda se puede concluir, que los hormigones con ARE se comportan mejor con respecto a los hormigones con ARSE en el recubrimiento de 30 mm. En cuanto se disminuye el recubrimiento ya no se puede obtener una mejora significativa, lo que puede ser causada por menos áridos encapsulados en esa zona pequeña para influir en el resultado.
5. Comparando los dos recubrimientos diferentes de 15 mm y 30 mm se muestra que los valores de los hormigones con ARE y ARSE se mantienen parecido en el caso de 15 mm cuales son distinto a los valores en el recubrimiento de 30 mm donde se puede observar una mejora del ARE alrededor de un 50%.

Recomendaciones

1. Se recomienda hacer estudios más profundos con respecto a la corrosión en los hormigones con áridos reciclados y la influencia que tiene la fracción encapsulada.
2. Evaluar el efecto de la carbonatación en la corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigones elaborados con áridos reciclados encapsulados y sin encapsular.
3. Mejorar el protocolo de preparación y colocación de las muestras en una cámara de curado para mantener constante temperatura y humedad relativa en vista a corregir las posibles fuentes de errores.

Bibliografía

- ALAEJOS, P. 2006. Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural.
- ARENAS, M. D. C. M. 2012. *Materiales sostenibles en la edificación: residuos de construcción y demolición, hormigón reciclado*. Università Politecnica delle Marche.
- BELLO, P. M. *Determinación de la Velocidad de Corrosión en Armaduras Mediante Técnicas Cuantitativas de Análisis Electroquímico*. Universitat Politècnica de Valencia.
- BENEDICTO, J. A. P. 2010. Estudio sobre propiedades mecánicas del hormigón reciclado con áridos procedentes de la no calidad en prefabricación.
- BERMÚDEZ ODRIOZOLA, M. Á. 2007. *Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida*. Caminos.
- C.M. HANSSON , A. P., A LAURENT 2006. Corrosión de macroceldas y microceldas de acero en cemento Portland ordinario y hormigón de alto rendimiento. *WATERLOO, U. O. (ed.). Ontario, Canada Department of Mechanical Engineering*.
- CEREIJO, C. S. 2010. Caracterización mecánica de hormigones con alto contenido de finos. Catalonia.
- ELSENER, B., ANDRADE, C., GULIKERS, J., POLDER, R. & RAUPACH, M. 2003. Hall-cell potential measurements—Potential mapping on reinforced concrete structures. *Materials and Structures*, 36, 461-471.
- ETXEBERRIA, M., MARI, A. & VAZQUEZ, E. 2007. Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and structures*, 40, 529-541.
- FOMENTO, M. 2008. Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. *Fomento, Madrid, España*.
- GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, J. A. M. V., JUANA MARÍA 2007. Corrosión en las estructuras de Hormigón Armado: fundamentos, medida, diagnóstico y prevención.
- GUINER 2006. Carbonatación vs. aluminosis.
- HERNÁNDEZ, D. 2009. Estudio de las propiedades físico-mecánicas y la durabilidad del hormigón reciclado. . Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría: Ciudad Habana.
- LANGFORD, P. & BROOMFIELD, J. 1987. Monitoring the corrosion of reinforcing steel. *Construction Repair*, 1.
- LTD, M. A. S. 2015. Manual de operación-Ensayos de durabilidad de hormigón.
- LUIS EBENSPERGER , R. T. 2010. Medición "in situ" de la permeabilidad al aire del hormigón: status quo.
- MARTÍNEZ-LAGE, I. 2007. *Estudio sobre los residuos de construcción y demolición en Galicia: método de estimación de la producción anual y usos posibles para su reciclaje*. Universidade da Coruña.
- MÉNDEZ, L. R. P. 2010. *Vida útil residual de estructuras de hormigón armado afectadas por corrosión*. Caminos.
- MORENO, A. D. V. 2001. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. *Publicación técnica*.
- NAGATAKI, S., GOKCE, A., SAEKI, T. & HISADA, M. 2004. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, 34, 965-971.
- NC_95 2011. Cemento Pórtland. Especificaciones.
- NC_96 2011. Cemento con adición activa — especificaciones
- NC_120 2014. Hormigón Hidráulico. Especificaciones.
- NC_174 2002. Hormigón fresco. Determinación del asentamiento por el cono.
- NC_178 2002. Áridos-Análisis Granulométrico.
- NC_181 2002. Áridos-Determinación del Peso Volumétrico-Método de Ensayo.
- NC_182 2002. Áridos-Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074mm (No. 200).
- NC_186 2002. Arena- Peso específico y absorción de agua-Método de ensayo.
- NC_187 2002. Árido grueso-Peso específico y absorción de agua-Método de ensayo.
- NC_221 2002. Hormigón. Elaboración de probetas para ensayos.

- NC_250 2005. Requisitos de durabilidad para el diseño y construcción de edificaciones y obras civiles de hormigón estructural, Cuba.
- NC_251 2013. Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos.
- NC_353 2004. Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones.
- NC_355 2004. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio.
- NC_504 2013. Cemento Hidráulico — Método de Ensayo — Determinación de La Estabilidad de Volumen.
- NC_506 2013. Cemento hidráulico — Método de ensayo — Determinación de la resistencia mecánica.
- NC_507 2007. Cemento Hidráulico—Método de Ensayo— Análisis Químico.
- NC_524 2015.** Cemento Hidráulico — Método de Ensayo — Determinación de La Consistencia Normal Y Tiempos de Fraguado por Aguja Vicat.
- NC_724 2009. Ensayos del hormigón — Resistencia del hormigón en estado endurecido.
- NC_752 2010. Barras de acero soldada para refuerzo de hormigón-Especificaciones.
- PAVON DE LA FE, E., ETXEBERRIA LARRANAGA, M. & DIAZ BRITO, N. 2010. Empleo del arido reciclado de hormigon en la fabricacion de hormigon estructural. e-libro, Corp.
- RAHARINAIVO, A. G., JEAN-MARIE R 1986. Sobre la corrosión de armaduras de hormigón en presencia de cloruros On the corrosion of reinforcing steels in concrete in the presence of chlorides. *Materiales de Construcción*, 36.
- RODRÍGUEZ, S. B. 2009. Resistencia a la corrosión del hormigón hidráulico.
- RODRÍGUEZ, S. B. 2012. Consistencia y laborabilidad del hormigón.
- SA, P. 2014. La solución de resistividad eléctrica completa para ensayos de durabilidad.
- SOHAIL, M. G., LAURENS, S., DEBY, F. & BALAYSSAC, J. P. 2013. Significance of macrocell corrosion of reinforcing steel in partially carbonated concrete: numerical and experimental investigation. *Materials and Structures*.
- TAM, V. W., WANG, K. & TAM, C. M. 2008. Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 152, 703-714.
- TSUYOSHI MARUYA , H. T., KENICHI HORIGUCHI , SATORU KOYAMA AND KAI-LIN HSU 2007. Simulation of Steel Corrosion in Concrete Based on the Model of Macro-Cell Corrosion Circuit. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5.
- VIDAUD, E. 2012. La carbonatación en el concreto reforzado.

Anexos

Ficha Técnica Dynamon Sx-32



DATOS TÉCNICOS (valores característicos)	
DATOS DE IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO	
Consistencia:	líquido
Color:	ámbar
Densidad según la ISO 758 (g/cm ³):	1,08 ± 0,02 a +20°C
Residuo seco según EN 480-8 (%):	22,1 ± 1,1
Acción principal:	aumento y conservación de la trabajabilidad y/o reducción de agua
Clasificación según EN 934-2:	reductor de agua de alta eficacia / superfluidificante, prospecto 11.1,11.2
Cloruros solubles en agua según EN 480-10 (%):	< 0,1 (ausentes según EN 934-2)
Contenido de álcali (Na ₂ O) equivalente según EN 480-12 (%):	< 3,5
pH según la ISO 4316:	6,5 ± 1
Conservación:	12 meses en los envases originales no abiertos, proteger del hielo
Clasificación de peligrosidad según la Directiva 1999/45/CE:	ninguna. Antes del uso consultar el párrafo "Instrucciones de Seguridad para la preparación y la puesta en obra", las instrucciones de los envases y la Ficha de Seguridad
Partida arancelaria:	3824 40 00