

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Construcciones

Departamento Ingeniería Civil

TRABAJO DE DIPLOMA

**Título: Monitoreo de la corrosión inducida por penetración de
cloruros. Método de la macrocelda.**

Autor: José Félix Carrero Mateus.

Tutor: MSc. Sandra Lichtblau

Prof. Dr. Fernando Martirena

Santa Clara, junio 2018
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Pensamiento

Nunca consideres el estudio como una obligación sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.

Albert Einstein

Dedicatoria

*A mi mama Nancy Caridad por la dedicación, el sacrificio y la
entrega con que me ha criado.*

*A mi papa Saturnino por siempre estar presente y haber construido
un digno ejemplo a seguir.*

*A mi hermana Anabela por ser un ejemplo y motor impulsor
en el estudio, por brindarme siempre su apoyo
incondicional.*

*A mi esposa Sugeifys e hijo Anthony José para el que quiero
ser un ejemplo a seguir.*

*A mis abuelos Alfredo, Lidia, Margarita, Diego y Norberto
que, aunque ya no esté en vida siempre lo llevo presente.*

A mis suegros Jorge y Daisy.

*A mi tío Orlando que ha sido un educador y padre para mí,
y un gran ejemplo.*

Agradecimientos

*Un agradecimiento especial a mis padres, a mi hermana, mis
abuelos y mi tío por su dedicación, ayuda y sacrificio
durante todos estos años.*

*A mi esposa Sugeilys, los suegros por el apoyo brindado y el
cariño recibido que me ha ayudado mucho durante todo
este tiempo.*

*A mi tutora y amia Sandra por el apoyo, la paciencia,
dedicación, y exigencia durante todo este tiempo.*

*A mis anteriores y presentes compañeros de cuarto por los
buenos momentos que hemos vivido por esas noches
incansable de fiesta, estudio y ayuda prestada, uno hacia
los otros como hermanos que hemos sido durante estos
años compartidos.*

*A Yoel, Evelin, Felipe, Enisel Erik, y Dani por la ayuda
prestada en el laboratorio de materiales.*

*A los profesores Sergio Betancourt, Iván, Yosvany, María
Betania y al profesor consultante Dr. Ing. Fernando
Martirena por su ayuda en los momentos de
incertidumbre.*

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

Muchas Gracias a todos.

Los áridos reciclados constituyen un importante aporte al desarrollo socioeconómico con respecto al agotamiento de los recursos no renovables, donde los áridos representan aproximadamente el 60-75% de la mezcla de hormigón y pueden ser reutilizados. La producción de hormigones con áridos reciclados conlleva a un aumento en la consistencia y la absorción para una misma relación agua-cemento. Se empleó la técnica del encapsulamiento de la fracción de 5-9mm en áridos para estudiar las mejoras que tienen los 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 penetración de cloruros. Los Cloruros penetran en el hormigón destruyendo la capa protectora que cubre al acero y provocando una pequeña zona anódica con relación a la catódica, las condiciones desfavorables de la superficie producen una profunda y acelerada penetración de la corrosión en el acero de refuerzo. La presencia de cloruros en el concreto puede provenir de sus componentes como en el cemento, agua, agregados, aditivos o también en el ambiente. El componente del cemento que reacciona con los iones de cloruro es el Aluminato tricálcico (C3A), formando Cloro aluminato cálcico lo cual provoca la disminución del pH provocando el medio ácido que genera la corrosión. En el presente trabajo estudiaremos el comportamiento de los aceros dentro del hormigón producido con áridos reciclados y cemento P-35 ante la penetración de cloruros. Se aplicará el método de la Macrocelda para evaluar en tiempo real y condiciones controladas el estudio de la corrosión en especímenes de hormigón armado con áridos reciclados y cemento P-35. Mediante el método desarrollado de la Macrocelda 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; corrosión; macrocelda

Recycled aggregates constitute an important contribution to the socioeconomic development with regard to the exhaustion of non-renewable resources, where aggregates approximately represent 60-75% of the concrete mixture and can be reused. The production of concretes with recycled aggregate leads to a reduction of its consistency and an increase of the absorption for the same water-cement ratio. The technique of the encapsulation of the fraction of 5-9 mm of recycled aggregates was used to study the improvements of the concretes elaborated with it. Reinforced concretes are affected by the phenomenon of corrosion during their life, this reaction suffered in the steel bars often is caused by the process of penetration of chlorides. The chlorides penetrate into the concrete and destroy the protection layer which covers the steel, causing a small anodic area with relationship to the cathodic one. The unfavorable conditions of the surface produce a deep and quick penetration of the corrosion in the reinforcement. The presence of chlorides in concretes can arise from its components for example in the cement, water, aggregates, admixtures or also from the atmosphere. The component of the cement which reacts with the ions of chloride is the tricalcium aluminate (C3A), forming calcium aluminate chloride which causes the decrease of the pH causing the acid ambient which generates the corrosion. In the presented work the behavior of steel in concrete produced with and P-35 (CEM I), where common aggregates are replaced by recycled aggregates) is studied with regard to chloride penetration. The macrocell method is applied to evaluate the behavior of the corrosion in reinforced concrete samples with recycled aggregate and P-35 in real time and controlled condition the behavior. The developed method of the Macrocell enable to calculate the half-cell potential, the current density inside the circuit between the steel bars and the ohm resistance.

Keywords: Recycled aggregates, corrosion, macrocell

Índice

Introducción.....	1
Capítulo I: La corrosión del acero en hormigones con áridos reciclados. Tipos y especificaciones. ...	5
1.1 Hormigón hidráulico	5
1.1.1 Características físicas del hormigón	6
1.2 Hormigón hidráulico con áridos reciclados encapsulados.....	7
1.2.1 Materiales pétreos reciclados.....	7
1.2.2 Definición, clasificación y uso de los áridos reciclados	8
1.2.3 Propiedades de los áridos reciclados	9
1.3. Propiedades del hormigón con áridos reciclados	11
1.3.1 Propiedades en estado fresco.....	11
1.3.2 Propiedades en estado endurecido	12
1.4 Durabilidad del hormigón armado con áridos reciclados	14
1.4.1 Factores que influyen en la durabilidad del hormigón armado con áridos reciclados	15
1.4.2 Corrosión.....	18
1.4.3 Corrosión por acción de cloruros.....	23
1.4.4 Corrosión del acero por Carbonatación	24
1.5 Modelo de la macrocelda.....	26
1.6 Conclusiones Parciales	28
Capítulo II: <i>Aplicación del protocolo de la Macrocelda para la evaluación de la corrosión de especímenes de hormigón armado con áridos reciclados.</i>	30
2.1 Diseño experimental de mezclas de hormigón para especímenes de hormigón armado con áridos reciclados	30
2.2 Caracterización de los materiales constituyentes del hormigón	31
2.2.1 Áridos reciclados	31
2.2.2 Cemento P-35.....	35
2.2.3 Agua de amasado	36
2.2.4 Aditivo	36
2.3 Acero	38
2.3.1 Acero inoxidable.....	38
2.3.2 Acero al Carbono	39
2.4 Fabricación de hormigones.....	40
2.4.1 Dosificación de las mezclas de hormigón empleadas	40
2.4.2 Producción de hormigón	41
2.4.3 Moldes empleados	42

2.4.4 Llenado de probetas, compactación y conservación	42
2.5 Ensayos al hormigón en estado fresco	43
2.5.1 Docilidad.....	43
2.5.2 Consistencia	43
2.6 Ensayos al hormigón en estado endurecido	45
2.6.1 Resistencia mecánica a compresión a edades de 7 y 28 días.....	45
2.6.2 Resistividad a edad de 28 días	46
2.6.3 Permeabilidad al aire a 28 días	48
2.7 Método experimental.....	49
2.7.1 Protocolo Macrocela. Metodología empleada	49
2.7.2 Equipos y materiales empleados para penetración de cloruros.....	50
2.7.3 Equipos y materiales empleados para evaluación de la corrosión	50
2.8 Ensayo de la Macrocela. Procedimiento y desarrollo.....	50
Conclusiones parciales.....	51
Capítulo III: Análisis de resultados obtenidos de corrosión del acero de refuerzo en especímenes de hormigón fabricados con áridos reciclados.....	52
3.1 Ensayos del hormigón en estado fresco	52
3.1.1 Asentamiento.....	52
3.2 Ensayos del hormigón endurecido.....	53
3.2.1 Resistencia a compresión.....	53
3.2.2 Resistividad	54
3.2.3 Permeabilidad al aire	55
3.3 Método de la Macrocela.....	56
3.3.1 Resultados previos del protocolo de la Macrocela	56
Conclusiones parciales.....	57
Conclusiones generales.....	58
Recomendaciones.....	59
Bibliografía	60
Anexos.....	62

Introducción

El hormigón es un material de construcción constituido básicamente por rocas (Áridos), de tamaño máximo limitado, que cumplen ciertas condiciones en cuanto a sus características mecánicas, químicas y granulométricas, unidas entre sí por una pasta aglomerante hidráulica formada por un conglomerante (cemento) y agua. A este material básico y en el momento de su amasado, pueden añadirse otros productos o materiales para mejorar algunas características determinadas (Adiciones y aditivos).

A pesar de que los materiales que componen al hormigón son abundantes, su producción demanda altos niveles de consumo de recursos no renovables y de energía en sus distintas formas. Producto a estas características, se trata de una actividad que genera fuertes impactos sobre el medio ambiente.

Entre los impactos ambientales que genera la construcción se encuentra los que provienen de sus residuos sólidos. 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, Etxeberria Larranaga et al. 2010)

Debido a la voluntad de cerrar el ciclo de los RCDs (Residuos de Construcción y Demolición) de manera adecuada se ha tratado de hallar un uso en el hormigón al árido reciclado. El problema que lleva un hormigón con áridos reciclados es una disminución de las propiedades del mismo en cuanto a sus propiedades físicas-mecánicas y de la durabilidad debido al mortero adherido en el árido. El hormigón con áridos reciclados tiene una mayor porosidad, cual facilita la absorción y la difusión de agua, gases y sales al hormigón.

El hormigón reforzado con varillas de acero es uno de los materiales de construcción más usado a nivel mundial, sin embargo, presenta el inconveniente de ser susceptible a fallar por corrosión. La corrosión es la interacción de un metal con el medio que lo rodea, produciendo el consiguiente deterioro en sus propiedades tanto físicas como mecánicas. La característica fundamental de este fenómeno es que

solo ocurre en presencia de un electrólito, ocasionando regiones plenamente identificadas, llamadas estas anódicas y catódicas.

La corrosión electroquímica del acero de las armaduras del hormigón es probablemente la causa de deterioro en el hormigón más importante, afectando al acero, al hormigón y a la adherencia de ambos. Las principales causas de la destrucción de la capa pasiva del acero son la disminución de la alcalinidad del hormigón por reacción con sustancias ácidas del medio o la presencia de iones cloruro que pueden penetrar en el hormigón llegando hasta el acero y rompiendo la capa pasiva. La disminución de la alcalinidad da lugar a una corrosión generalizada.

Para prevenir que exista la posibilidad de que en un futuro la corrosión provoque un deterioro en la estructura de hormigón armado, se debe tomar en cuenta, que el recubrimiento debe tener un espesor suficiente y además el hormigón tenga una estructura de poros adecuada. En el caso de los hormigones producidos con áridos reciclados, para disminuir la porosidad del árido, se realiza el encapsulamiento del mismo.

En consideración, se asume como **problema científico**:

Como influye la encapsulación de áridos reciclados (5-9 mm) en la corrosión inducida por penetración de cloruros en especímenes de hormigones armados.

Hipótesis:

Si se encapsula la fracción de 5-9mm de los áridos reciclados para la elaboración de hormigones armados, se logra aumentar la resistencia a la corrosión inducida por la penetración de cloruros en dichos especímenes.

Campo de Acción

Especímenes de hormigón armado con áridos reciclados. (encapsulados y sin encapsulación).

Objetivo General

Evaluar la corrosión inducida por penetración de cloruros en hormigones armados producidos con áridos reciclados encapsulados (5-9mm)

Objetivos específicos:

- Analizar la influencia de los áridos reciclados en la corrosión inducida por penetración de cloruros.
- Determinar a partir del método de la macro celda el efecto del encapsulamiento de la fracción 5-9mm en hormigones armados elaborados con áridos reciclados.
- Evaluar el efecto de la encapsulación de la fracción 5-9mm en la corrosión de hormigones armados producidos con áridos reciclados.

Tareas científicas:

- Revisión bibliográfica acerca de la corrosión en ambientes con elevado contenido de cloruros de hormigones armados con áridos reciclados.
- Definición del protocolo del ensayo de la Macro celda.
- Determinación del avance de la corrosión en los especímenes de hormigón.
- Medición de la corrosión con el método de la Macro celda
- Evaluación del estado de corrosión en los especímenes de hormigón armados elaborados con áridos reciclados.

Novedad científica:

El uso del encapsulamiento de la fracción de 5-9mm como reductor de la corrosión en hormigones armados elaborados con áridos reciclados

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 Macrocelda.

Metodológico

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

Capítulo I: La corrosión del acero en hormigones con áridos reciclados. Tipos y especificaciones.

1.1 Hormigón hidráulico

La palabra Hormigón parece ser que tiene su origen en Roma. En un estudio sobre el origen de los términos hormigón y concreto, M. Teresa Solesio, describe como Plinio habla de los "paries formaceus" de los que deriva la palabra "hormazo" significativa de molde o forma. Etimológicamente, M.T. Solesio, contempla varias hipótesis, algunas muy curiosas, como la que hace referencia a la relación existente entre "hormigón" y "hormigos" o plato de repostería hecho con almendras y avellanas tostadas unidas por miel.

No hay que pensar que el hormigón ha tenido siempre la misma constitución pues, desde el año 3.000 antes de J.C. en que se encuentran en el norte de Chile las primeras muestras de un hormigón rudimentario en el que se emplea como conglomerante algas calcinadas (huiró) mezcladas con agua de mar, hasta nuestros días, este material ha tenido que vencer muchas etapas en las que siempre ha existido un elemento invariable en su composición (las rocas), pero el cemento que las unía entre sí ha ido cambiando de acuerdo con las circunstancias, no solo cronológicas sino también locales. La cal, las puzolanas, los cementos naturales, etc., han ido perfeccionando poco a poco a aquel hormigón en el que se empleaban algas calcinadas y cuyos morteros alcanzaban la resistencia a compresión, nada despreciable para aquellos tiempos, de 6 N/mm² (60 kgf/cm²).

El que al hormigón se le considere hoy como el rey universal de los materiales de construcción se debe a sus indiscutibles ventajas. En primer lugar, hay que decir a su favor que es un material que permite conseguir piezas de cualquier forma por complicada que esta sea, con la única limitación de la menor o mayor complejidad del molde y esto debido al carácter plástico que posee cuando se encuentra en estado fresco.

En segundo lugar, el hormigón es un material con resistencias apreciables a compresión y que, aunque posea resistencias débiles a tracción permite aumentarlas apreciablemente valiéndose del acero al que puede incorporar en su seno y en los lugares adecuados dando lugar al hormigón armado y pretensado. En tercer lugar, el hormigón presenta la ventaja sobre otros materiales resistentes de

proporcionar piezas con un gran monolitismo, incluso en los nudos, haciendo que pueda prescindirse de juntas o uniones que, a veces, son zonas débiles. Desde este punto de vista, el hormigón se comporta mejor que las construcciones pétreas (mamposterías y sillerías), que las fábricas de ladrillo y que las estructuras de acero laminado.

Cabrían darse otras muchas razones de peso que justifican el que este noble material haya alcanzado el lugar de privilegio que tiene, pero, quizás, una de las más notables es que está formado por materiales abundantes y baratos por lo que es difícil suponer que en un futuro le pueden salir competidores que le hagan perder su primer puesto.

De los ciento tres elementos conocidos, solo el oxígeno, silicio, aluminio, hierro y calcio, forman el 90,5 por 100 de la litósfera. De estos, solo el oxígeno se encuentra casi en el 50 por 100 y los otros cuatro restantes se encuentran formando combinaciones con este, con el carbono, azufre, etc, dando lugar a compuestos más o menos complejos que constituyen la mayor parte de las rocas.

1.1.1 Características físicas del hormigón

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

- Densidad: en torno a 2350 kg/m³
- Resistencia a compresión: de 150 a 500 kg/cm² (15 a 50 MPa) para el hormigón ordinario. Existen hormigones especiales de alta resistencia que alcanzan hasta 2000 kg/cm² (200 MPa).
- Resistencia a tracción: proporcionalmente baja, es del orden de un décimo de la resistencia a compresión y, generalmente, poco significativa en el cálculo global.
- Tiempo de fraguado: dos horas, aproximadamente, variando en función de la temperatura y la humedad del ambiente exterior.
- Tiempo de endurecimiento: progresivo, dependiendo de la temperatura, humedad y otros parámetros.

- De 24 a 48 horas, adquiere la mitad de la resistencia máxima; en una semana 3/4 partes, y en 4 semanas prácticamente la resistencia total de cálculo.
- Dado que el hormigón se dilata y contrae en magnitudes semejantes al acero, pues tienen parecido coeficiente de dilatación térmico, resulta muy útil su uso simultáneo en obras de construcción; además, el hormigón protege al acero de la oxidación al recubrirlo.

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

1.2 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. (Pérez Benedicto 2011)

1.2.1 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 poli minerales, 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.

1.2.1.1 Clasificación de los residuos

Los residuos se clasifican por su elemento mayoritario y su grado de impurezas en: los limpios y los sucios. Los RCDs limpios están compuestos por un elemento mayoritario superior al 95% en peso y contienen un porcentaje de impurezas menor del 5% en peso, entendiendo por impurezas a los residuos inertes no peligrosos, plásticos, maderas o elementos metálicos.(Tertre 2007) Los limpios se utilizan en la elaboración de áridos reciclados.

También se clasifican en función de su procedencia en: los residuos producidos en el proceso de construcción y los residuos de demoliciones o desmantelamiento de estructuras existentes.

Los componentes fundamentales de los RCDs según investigaciones del Centro de Desarrollo y Experimentación (CEDEX), en España son: materiales cerámicos, hormigón, piedra y áridos en general; que representan aproximadamente un 75% del total de desechos industriales, públicos y colectivos generados cada año en el mundo.

1.2.2 Definición, clasificación y uso de los áridos reciclados

Se clasifican en tres grupos: áridos procedentes de escombros de hormigón, procedentes de materiales cerámicos y los provenientes de escombros mixtos.

a) Áridos procedentes de escombros de hormigón: se obtienen de los procesos de machaqueo, cribado y tamizado de los residuos de hormigón y áridos naturales. Se derivan de un solo tipo de material, el hormigón, y permiten otros componentes en determinadas proporciones. La norma holandesa considera un contenido mínimo del 80% del hormigón y con densidad superior a 2100 kg/m³ (Alaejos, 2008). Figura 1.3a. Dentro de los áridos reciclados producidos a partir de hormigón se destacan, según(Tertre 2007), la zahorra fracción 0-40 mm y 6-20 mm, empleada para bases

y sub bases de carreteras. Otra de sus aplicaciones es como reemplazo parcial del árido natural en hormigón estructural o no estructural, manteniéndose los criterios de dosificación de los hormigones convencionales (Alaejos, 2008).

b) Áridos reciclados procedentes de materiales cerámicos: se obtienen de residuos de material cerámico. Según la normativa holandesa el 85% de este árido debe tener un peso específico superior a 1600 kg/m³ para evitar materiales excesivamente porosos y ligeros (Alaejos, 2008). Estos áridos se aplican en drenajes, bases y sub bases de carreteras y también para la fabricación de hormigón de baja resistencia.(López Gayarre 2008)

c) Áridos reciclados mixtos: se obtienen de la mezcla de residuos de distinta naturaleza. La norma holandesa los define como áridos que contienen un porcentaje de hormigón superior al 50% con densidad superior a 2100 kg/m³ y no más del 50% de materiales cerámicos(López Gayarre 2008). Figura 1.3c. La fabricación de hormigones y morteros es una de las aplicaciones de estos áridos. Se puede utilizar en estructuras de hormigón en masa y armado como: muros de sótano, pilas de hormigón, chimeneas, elementos de hormigón armado prefabricado, bloques o tejas de hormigón(Terre 2007).

1.2.3 Propiedades de los áridos reciclados

Las propiedades de los áridos reciclados dependen de: el grado de limpieza del árido, el origen del RCD, las técnicas de procesamiento, así como de las propiedades de los materiales originales. Por estas razones presentan características que los distinguen de los áridos naturales como son: mayor porosidad, superficie áspera e irregular, bajo peso específico, gran porcentaje de poros, elevada absorción de agua, menor resistencia mecánica y menor durabilidad (Sánchez de Juan, Alaejos et al. 2010)

Granulometría

La granulometría de los áridos reciclados depende del sistema de trituración para su producción y del tipo de residuos de origen. Para un mismo tamaño máximo del árido e igual sistema de trituración, los áridos reciclados pueden presentar diferentes módulos de finura.

La granulometría puede afectar la reología y las propiedades mecánicas del hormigón. Las trituradoras de impacto son las que más reducen el tamaño de las

partículas, seguidas de las quebrantadoras de cono y las de mandíbulas (Kobayashi and Kawano 1988). El autor considera se debe tener cuidado con la obtención de áridos reciclados con elevados contenidos de materiales cerámicos. Los residuos cerámicos producen mayor contenido de finos durante la trituración comparado con los áridos que se obtienen de los residuos de hormigón.

Peso específico

El peso específico corriente de los áridos reciclados es inferior al de los naturales, lo que se debe a la presencia de pasta de mortero adherido al árido original y materiales con peso específico inferior al del árido convencional (Etxeberria Larrañaga 2004). Tienen un peso específico entre un 4-12% inferior al de los áridos naturales. El valor del peso específico corriente varía entre 2,067-2,65 kg/dm³, y el peso específico saturado sin humedad superficial, fluctúa entre 2,10-2,64 kg/dm³ (Sánchez, 2005; López, 2008 y Ulloa, 2012).

En el peso específico de los áridos reciclados influyen tres factores:

- Resistencia del hormigón original: Para una misma cantidad de mortero adherido, el árido obtenido de residuos de hormigón tendrá mayor peso específico mientras mayor resistencia mecánica posea el hormigón del cual proviene.
- Tamaño del árido: El peso específico del árido reciclado se incrementa el tamaño del grano, ya que en las fracciones mayores la cantidad de mortero adherido es menor.
- Las técnicas de procesamiento: cuando el procesamiento del árido grueso reciclado se realiza en sucesivas etapas de trituración, se elimina mayor contenido de mortero adherido, por lo que la calidad del árido mejora, y se incrementa el peso específico.

El bajo peso específico de los áridos reciclados afecta la reología del hormigón y produce una disminución de la resistencia mecánica y la durabilidad del mismo. Esta propiedad a juicio de la autora constituye un requisito de evaluación de los áridos reciclados. Por tanto, es de las propiedades más importantes, que permite definir los usos de los áridos reciclados.

Absorción

La absorción es una propiedad relacionada con el peso específico. En los áridos reciclados es siempre superior a la de los áridos naturales y depende del tamaño de las partículas, la calidad del hormigón original y las técnicas de procesamiento. Su valor varía entre el 3 - 13% tanto para la fracción gruesa como la fina (Ulloa Mayorga),(López Gayarre 2008).

Forma y textura superficial

La forma del árido reciclado es más angular que los áridos naturales, por el mortero adherido a los bordes del árido original que tiende a formar partículas más angulares (Morales *et al*, 2011). La EHE-08 indica que el coeficiente de forma del árido grueso no debe ser superior a 0,20, sin embargo, algunos especialistas aseveran que en los áridos reciclados se supera este valor (Sánchez de Juan 2004). El coeficiente de

forma del árido reciclado se encuentra entre 0,17-0,35. La textura de los áridos reciclados es más rugosa y porosa que los áridos naturales, lo cual se debe al mortero adherido a los áridos del hormigón original. El autor considera que la textura rugosa y porosa de los áridos reciclados, así como su forma irregular tienen una influencia negativa en la laborabilidad, la segregación y la exudación de los hormigones con áridos reciclados.

1.3. Propiedades del hormigón con áridos reciclados

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 están en el rango de 2100 a 2400kg/m³.

- 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 2400kg/m³ mientras que los áridos convencionales tienen unos valores de 2230 y 2410kg/m³ (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 (Saez 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 (Saez 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 (Pérez Benedicto 2011).

- 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).

1.3.2 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 (Pérez Benedicto 2011),

- Resistencia a cortante.

La disminución de la resistencia a cortante, según los estudios consultados de resistencia a cortante (Saez 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, Mari 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 (Vazquez, Alaejos et al. 2006)

1.4 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.

1.4.1 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.

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 (Giner-Juan 2009).

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): $F + 2H^+ + 2e^- \rightarrow F^- + H_2$

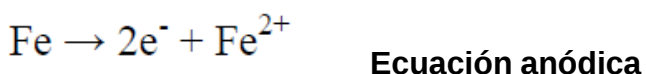
1.4.2 Corrosión

La corrosión es la interacción de un metal con el medio que lo rodea, produciendo el consiguiente deterioro en sus propiedades tanto físicas como químicas. La característica fundamental de este fenómeno, es que sólo ocurre en presencia de un electrólito, ocasionando regiones plenamente identificadas, llamadas estas anódicas y catódicas.

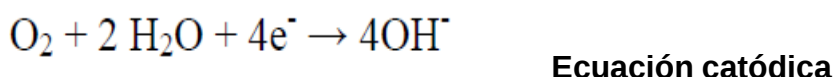
La corrosión puede ser mediante una reacción química (óxido-reducción) en la que intervienen la pieza manufacturada, el ambiente y el agua o por medio de una reacción electroquímica. (Paredes, Prieto et al. 2013)

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.

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



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



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

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

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

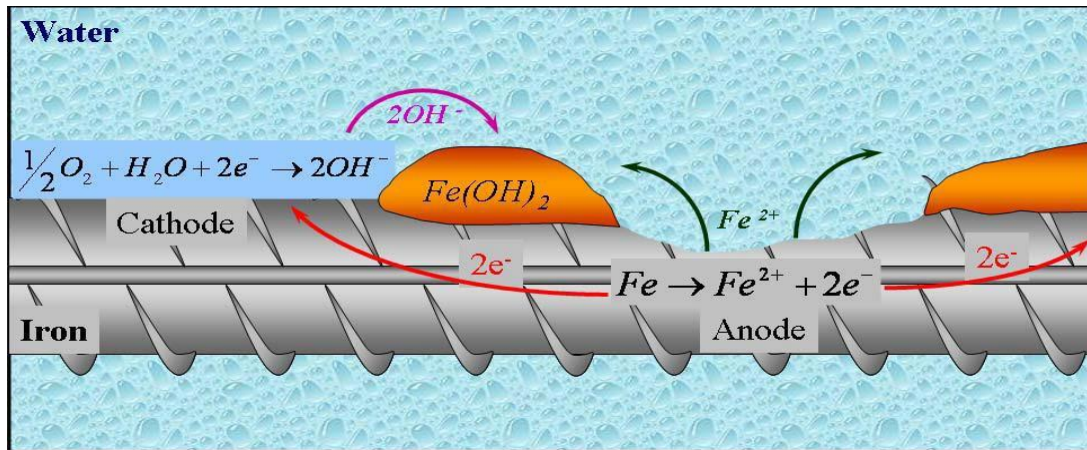


Fig. 1.1 Descripción gráfica del proceso de corrosión del acero de refuerzo en el hormigón armado.

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

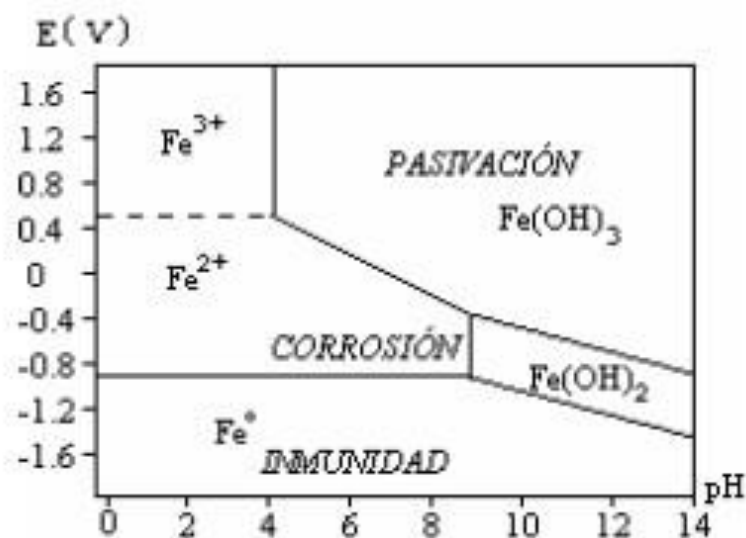


Fig. 1.2 Diagrama de Pourbaix del Fe a 25°C (del Valle Moreno, Pérez López et al. 2001).

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

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

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

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

La distribución de zonas es la siguiente:

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

De acuerdo a la cantidad de área corroída, se pueden considerar dos tipos de corrosión: la localizada, que se caracteriza por la destrucción local de la capa pasivante debido a la acción de un agente agresivo. La causa más frecuente que induce este tipo de corrosión es la presencia de iones despasivantes, tales como los cloruros, que al superar un determinado valor crítico rompen localmente la capa pasivante.

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

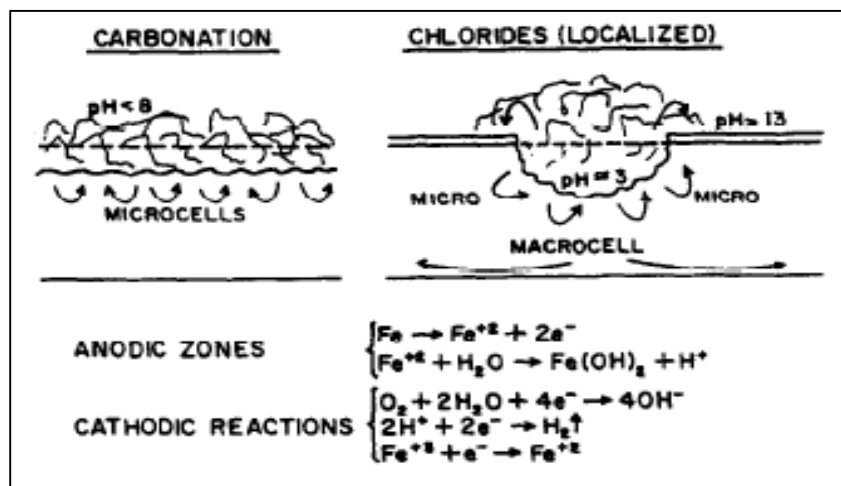


Fig. 1.3 Corrosión generalizada y localizada en armaduras de acero. Creación de microceldas y macroceldas de corrosión (Broomfield 1997).

1.4.2.1 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.

1.4.2.2 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 and 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.

1.4.3 Corrosión por acción de cloruros

Este fenómeno generalmente se produce en las zonas costeras, los iones de cloruros que se encuentran en el ambiente penetran en el hormigón destruyendo la capa protectora que cubre al acero y provocando una pequeña zona anódica con relación a la catódica, las condiciones desfavorables de la superficie producen una profunda y acelerada penetración de la corrosión en el acero de refuerzo. La presencia de cloruros en el concreto puede provenir de sus componentes como en el cemento, agua, agregados, aditivos o también en el ambiente. El componente del cemento que reacciona con los iones de cloruro es el Aluminato tricálcico (C3A), formando Cloro aluminato cálcico lo cual provoca la disminución del pH provocando el medio ácido que genera la corrosión. (Paredes, Prieto et al. 2013)

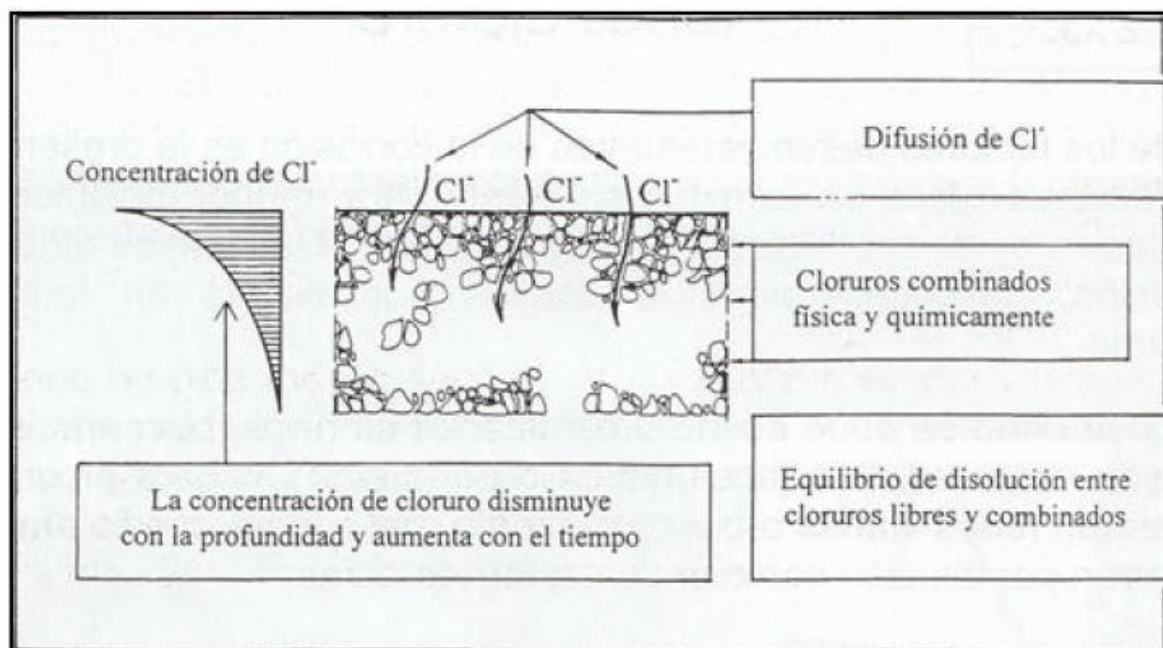
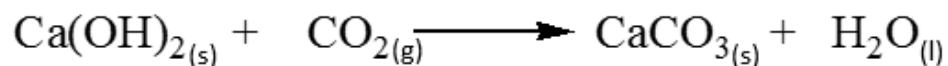


Figura 1: Fenómeno electroquímico de la corrosión por iones de cloruro

1.4.4 Corrosión del acero por Carbonatación

La carbonatación trata de la reacción que se produce entre el dióxido de carbono (CO_2) del aire y el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) resultante de la hidratación del cemento. Este proceso provoca una disminución del pH, desplazando a las armaduras de acero de la zona de pasivación a la zona de corrosión. Los hidróxidos de calcio (Ca(OH)_2), sodio (NaOH) y potasio (KOH) disueltos en la solución acuosa de la red de poros del hormigón (disolución de poros), provocan un pH de entre 12,5 y 13,5. El hormigón al ser poroso, permite la entrada y difusión del CO_2 reaccionando con la fase líquida intersticial saturada de hidróxido cálcico del hormigón y de los compuestos hidratados del cemento (disolución de poro) (Bello 2013).

En términos simplificados, se produce la siguiente reacción:



Cuando la totalidad del Ca(OH)_2 , NaOH y KOH presentes en los poros ha sido carbonatado, el pH comienza a decrecer. Al mismo tiempo los silicatos de calcio también reaccionan con el CO_2 del aire, prosiguiendo el descenso del pH del hormigón.

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

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

La naturaleza del cemento empleado influye en la cantidad de CO_2 combinado por la materia carbonatable del hormigón, pero no tiene influencia en el progreso posterior de la cinética de la corrosión. (Bello 2013)

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

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

donde:

X_c : Profundidad de la capa carbonatada (mm).

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

t : Tiempo (años).

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

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

- Contenido de CO_2 en la atmósfera.
- Permeabilidad de hormigón.
- Cantidad de sustancia carbonatable (contenido y tipo de cemento).
- Humedad relativa del ambiente.

Otras consideraciones que influyen en la carbonatación son que: un aumento en la relación agua/cemento favorece el proceso de carbonatación al aumentar la permeabilidad de los hormigones; por lo contrario, un aumento en la dosificación del cemento dificultaría el proceso. Por otro lado, humedades relativas entre el 50 y el 60 % favorecen al máximo la reacción de carbonatación, pero a partir de estos valores se presenta un descenso que llega a valores nulos cuando se tienen hormigones completamente saturados. De igual manera ambientes con alta polución afectan a la calidad del recubrimiento, causa directa para que se origine la corrosión por carbonatación (Villanueva 2012).

1.5 Modelo de la macrocelda.

La corrosión de acero en estructuras de hormigón sucede por un proceso de oxidación seguido por el desgaste de la película pasiva del acero, producto de la entrada de iones cloruro u óxido de carbono. Las grietas de corrosión no pueden identificarse directamente en la superficie de una estructura en la fase inicial, sino que sólo aparecen en la superficie de la estructura después de que un producto corrosivo alcance el límite de cantidad. Además, después de la aparición de la corrosión en la superficie, la corrosión significativa sucede a través de las grietas debido al flujo mayor de entrada de iones cloruro más óxido de carbono. Además, la seguridad de la estructura se verá amenazada por la propagación acelerada del proceso de corrosión. Por lo general, es aceptado dividir el proceso de corrosión en 4 etapas a saber: incubación, propagación, aceleración y deterioro (Arbolaez and Estrella 2017)

Es necesario estructurar un protocolo para determinar en tiempo real y bajo condiciones ambientales controladas, la corrosión del acero de refuerzo, en especímenes de hormigón completamente carbonatados elaborados con cementos P-35 y LC3. Para ello se propone un sistema de simulación de carbonatación total de los diferentes especímenes, donde a partir de un flujo energético (provocado por el movimiento interno de los electrones desde el ánodo hasta el cátodo) entre las varillas de acero inoxidable y de acero negro, embebidas en el hormigón, tendremos constancia del tiempo que se demora en corroerse el acero, y qué influencia tienen los distintos materiales componentes del hormigón, así como las distintas distancias de recubrimiento. De acuerdo con la especial distribución de las áreas anódicas y catódicas en la superficie del acero de refuerzo, pueden encontrarse dos tipos de corrosión en el hormigón reforzado, denominándose corrosión de micro celda o corrosión de macrocelda. La corrosión a nivel de micro celda resulta de un ambiente electroquímico del acero uniforme. En el caso de las áreas del ánodo y el cátodo, la corrosión ocurre inmediatamente en áreas adyacentes a la superficie de acero y por consiguiente cada electrón producido por la reacción anódica es localmente

consumido por la reacción catódica. La caída óhmica entre las microceldas anódicas y catódicas debido a la resistividad es despreciable (Arbolaez and Estrella 2017).

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, Laurens et al. 2013). Otra definición de este tipo de sistema es dado por Elsener y demás autores al considerar que el circuito macrocelda es un circuito de corrosión que se produce entre el ánodo y el cátodo a cierta distancia uno del otro. La velocidad de corrosión del acero en el hormigón aumenta principalmente debido a la formación de circuitos de macrocelda, a diferencia del proceso de corrosión del acero, que causa la subestimación de la tasa de corrosión justo por la intersección de las curvas de polarización anódica y catódica (Elsener, Andrade et al. 2003). Como resultado, es esencial tratar el proceso de corrosión del acero en el hormigón como un circuito de macroceldas tanto teórica como prácticamente.

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

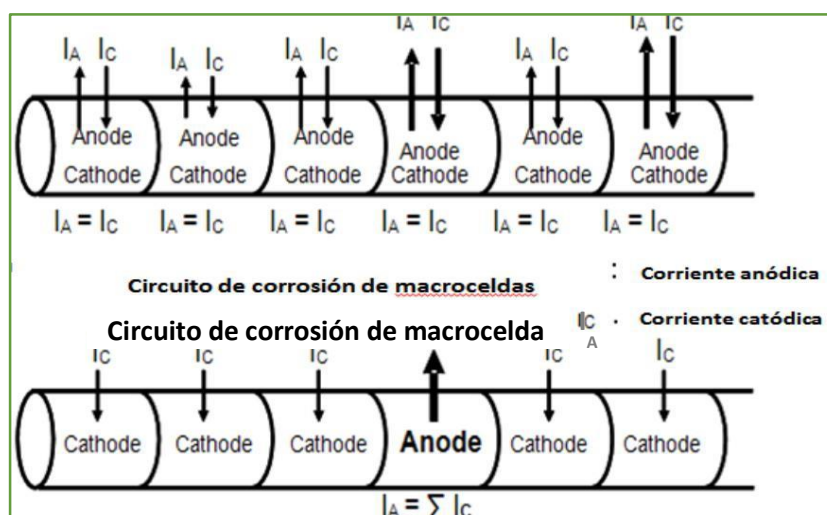


Fig.1.7 Modelo de circuitos de corrosión de microceldas y macroceldas (Elsener, Andrade et al. 2003).

Se supone que no hay interacción entre electrodos separados. Sin embargo, una vez que se inicia la corrosión, debe haber una interacción entre electrodos separados debido a la existencia de polarización. Como resultado, se establece un modelo para la corrosión de células macro, asumiendo la formación de una macrocelda como la interacción entre electrodos separados. Una vez que se tiene en cuenta la interacción entre electrodos separados, la polarización de activación es indispensable para generar la energía de activación esencial requerida para las reacciones de corrosión. Así, como muestra la Fig.1.7, la corrosión de macrocelda está relacionada con la formación de un circuito de macroceldas debido a la separación entre el ánodo y el cátodo a lo largo de la barra de refuerzo. El denominado modelo de corrosión de macroceldas significa otro efecto de polarización debido a la diferencia en el potencial de microceldas (Tsuyoshi Maruya 2007).

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

1.6 Conclusiones Parciales

1. Los hormigones con áridos reciclados presentan 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 debido a que poseen una mayor relación a/c tiene sus efectos negativos como un mayor índice de poros lo cual es más

propenso ataques químicos (carbonatación), abrasión y cualquier otro proceso de deterioro lo que puede afectar su forma original, calidad y vida útil.

3. Por lo general los métodos existentes para determinar el grado de corrosión del acero son destructivos y de difícil interpretación en los resultados, por lo que el método de la Macroelda resulta viable para determinar el fenómeno de la corrosión en tiempo real y condiciones ambientales controladas y constituye un método no destructivo.

Capítulo II: Aplicación del protocolo de la Macroelda para la evaluación de la corrosión de especímenes de hormigón armado con áridos reciclados.

Se expone en este capítulo el protocolo experimental para la obtención de los resultados que permitirán evaluar en tiempo real la corrosión del acero de refuerzo en hormigones producidos con áridos reciclados y 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 Macroelda.

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. Dichos especímenes fueron fabricados en el pasado año 2017 por lo que los procedimientos y las tablas que a continuación se mostraran fueron tomados del trabajo de diploma del Ing. Jean Brayan Reyes Avalos.

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 C_{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 según (NC_251, 2013)		Ensayos realizados		
9,5	100	Peso Específico (g/cm³)	Corriente	2.40
4,75	90-100		Saturado	2.48
2,36	70-100		Aparente	2.61
1,18	45-80	Peso Volumétrico (Kg/m³)	Suelto	1430.104
600 µ	25-60		Compactado	1614.854
300 µ	10-30	Absorción (%)	3.33	
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 según resultados			Ensayos realizados		
Tamiz	Retenido(g)	Pasado (%)			
9,5	0.0	100	Peso Específico (g/cm³)	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/m³)	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/cm ³)	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/m ³)	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/cm ³)	Corriente	2.44
19,0	90-100		Saturado	2.51
12,5	20-55		Aparente	2.6
9,5	0-15	Peso Volumétrico (Kg/m ³)	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/cm ³)	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/m ³)	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 la encapsulación es retirado de la paletizadora 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 to 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 insolubles (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 especifica que se considera apta para el amasado y curado de los hormigones y morteros el agua fresca potable, proveniente de acueductos y de otras fuentes de 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 ($>350 \text{ kg/m}^3$).



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 ₂ O) equivalente (%)	<3,5
Clasificación	Superfluidificante

2.3 Acero

Se emplearon dos tipos de acero, el acero al carbono, 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 al Carbono

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 seccion 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 óxido (figura 2.7).
4. Colocación del acero en alcohol isopropílico 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).



Figura 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 Selección 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/m³) 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
Árido fino (0-5 mm)	[kg]	628
Árido intermedio (5-9 mm)	[kg]	425
Árido grueso (9-19 mm)	[kg]	402
Agua	[kg]	173

2.4.2 cción 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)		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 virtió 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 agrego 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 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 enado 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 enrasa la superficie de las probetas para evitar rugosidades en la superficie de las mismas.

Las probetas se conservan durante 24 horas en los moldes. Transcurrido ese tiempo se extraen de los moldes y se marcan de forma que no se alteren las superficies que

han de estar en contacto con los platos de la prensa de ensayo. 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 cilidad

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 cuenta para el amasado, trasiego, colocación y, sobre todo, para la compactación del hormigón (Rodríguez, 2012)

2.5.2 ncia

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 Consistencia 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).

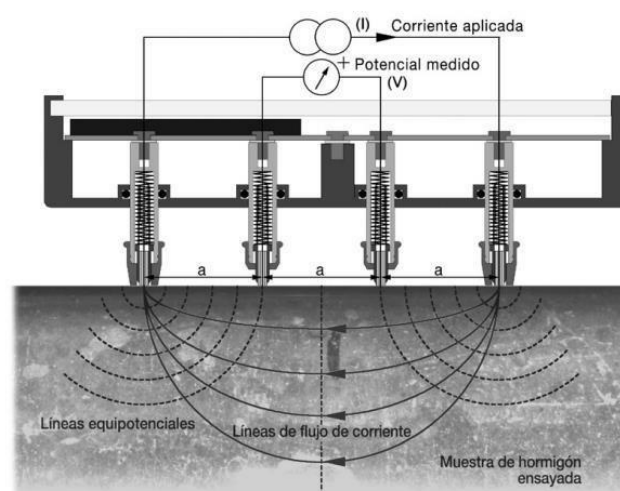


Figura 2.14: Equipo y principio del método

2.6.2.1 aración 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 ción 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 $\geq 100 \text{ k}\Omega\text{cm}$	Riesgo de corrosión insignificante
En caso de $= 50 \text{ a } 100 \text{ k}\Omega\text{cm}$	Bajo riesgo de corrosión
En caso de $= 10 \text{ a } 50 \text{ k}\Omega\text{cm}$	Riesgo de corrosión moderado
En caso de $\leq 10 \text{ k}\Omega\text{cm}$	Alto riesgo de corrosión

2.6.2.4 cación 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
> 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

2.6.3 ermeabilidad 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 ción 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)

2.7 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 Macrocelda. En trabajos de diplomas anteriores como el del ing. Jean Brayan Reyes Avalos, este método se aplicó para corrosión por carbonatación. En el presente trabajo de diploma se aplica este método para corrosión por penetración de cloruros.

2.7.1 ocolo Macrocelda. 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 Macrocelda.

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

- Lograr la penetración de cloruros mediante la absorción, agregando una solución de agua destilada con cloruro de sodio al 3% en un dique construido en la superficie de la probeta con pasta de cemento impermeabilizado con parafina.
- Circuito Macrocelda, circuito de corrosión que se produce entre el ánodo y el cátodo a cierta distancia uno del otro.
- Modelo de corrosión de macroceldas, 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 al carbono. Las cuales se miden a partir de un voltímetro.

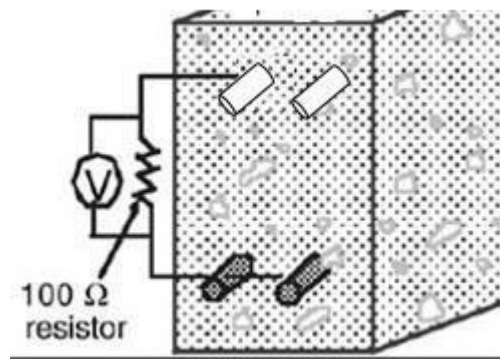


Figura 2.17: Medición de corriente.

2.7.2 materiales empleados para penetración de cloruros.

1. Dique construido con pasta de cemento para retención de líquidos.
2. Solución líquida de agua destilada con cloruro de sodio al 3% en 4 especímenes de un total de 8, (2 con áridos reciclados encapsulados y 2 con áridos reciclados sin encapsulación). A las 4 restantes se les agrega una solución con agua común para comparar.

2.7.3 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).

2.8 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.



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

2.9 Conclusiones parciales

1. Las propiedades físicas y mecánicas de los áridos reciclados dependen principalmente del origen de los escombros, así como la calidad de los mismos.
2. El método del Cono de Abrams para medir consistencia es de fácil aplicación y muy práctico a la hora de ser utilizado a pie de obra.
3. 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.

Capítulo III: Análisis de resultados obtenidos de corrosión del acero de refuerzo en 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
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	

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.

σ_{ck} (MPa)	σ_{ck} 7 Días	σ_{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

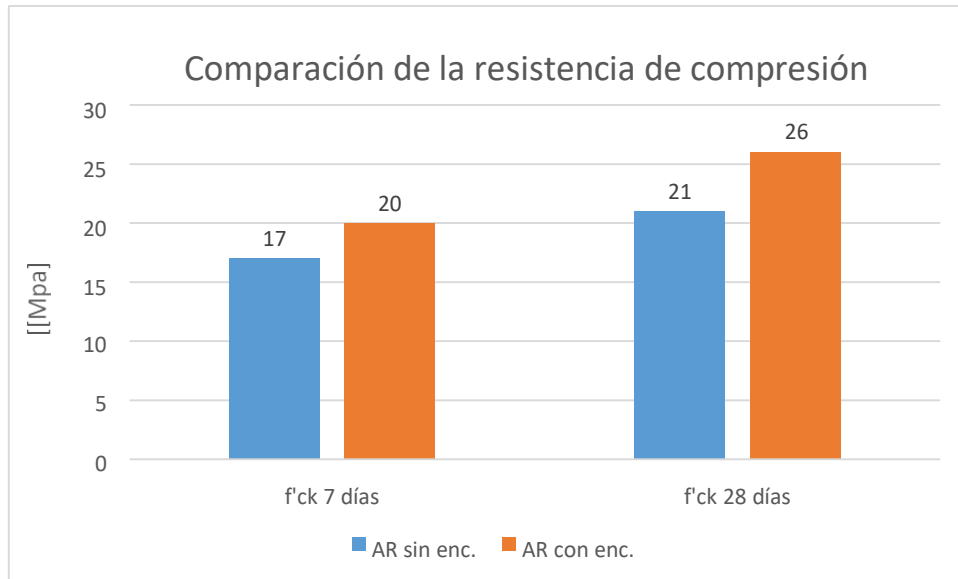


Figura 3.1: Resultados de compresión



Figura 3.2: Ensayo a compresión

3.2.2 sistividad

Tabla 3.3: Resultados obtenidos a partir de los 28 días

Resistividad (Repisod Family)	Resultado 28 días [kΩcm]						Resultados Promedio [kΩcm]	Temp. [°C]	Humedad [%]
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 ermeabilidad 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.					

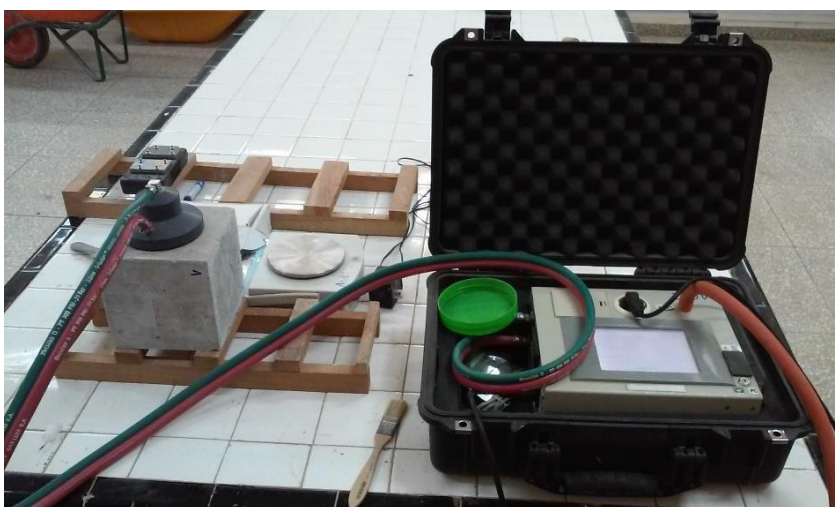


Figura 3.4: Ensayo de permeabilidad realizado a hormigón con áridos reciclados encapsulados.

3.3 Método de la Macroelda

3.3.1 Resultados previos del protocolo de la Macroelda

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

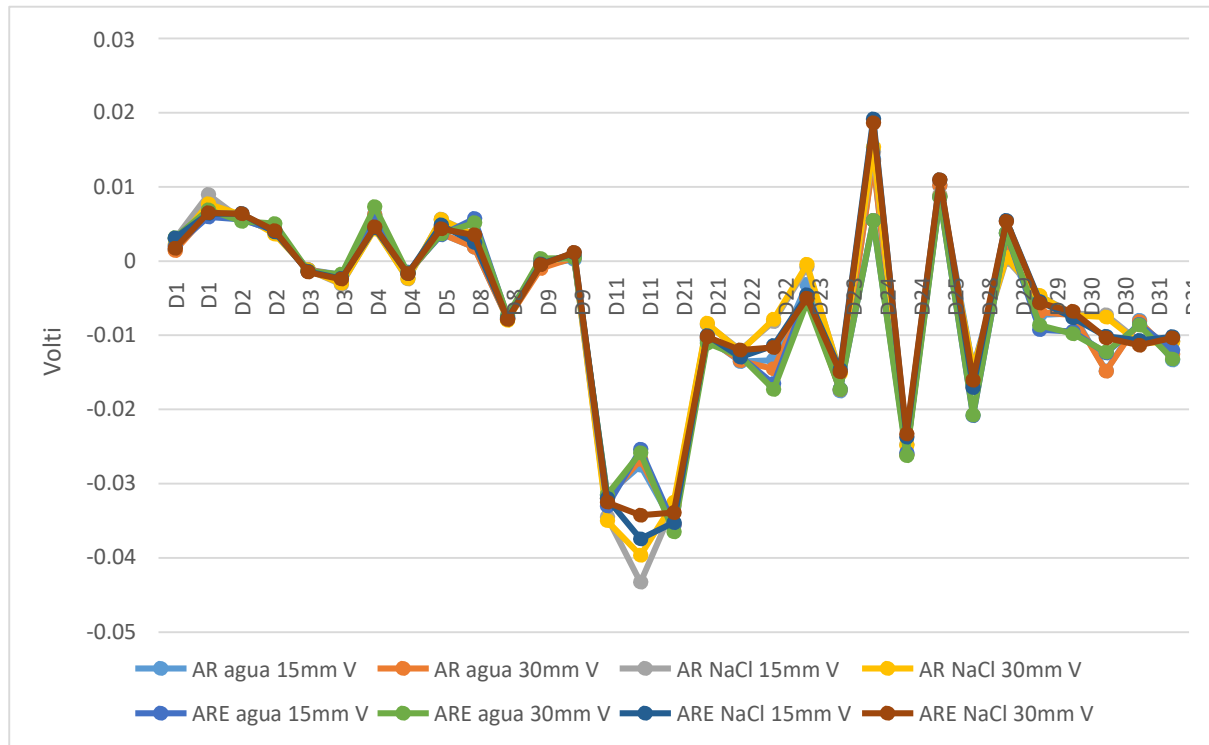


Gráfico 3.2: Valores de corriente (I) para hormigones armados

Como se puede observar en el gráfico anterior se realizaron mediciones durante 31 días y hasta ese momento no se notaron diferencias significativas entre los distintos tipos de materiales, soluciones y recubrimientos lo que significa que no se había desencadenado la corrosión a los 31 días de haber comenzado el experimento lo que es de esperar para un periodo de tiempo tan corto.

Las pequeñas diferencias que se aprecian en los valores de corriente se deben a posibles fuentes de errores las cuales pueden ser:

- El estado de la superficie.
- Un mal contacto entre el 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 el método de la Macrocelda.

3.4 Conclusiones parciales

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.

3.5 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. Hasta este momento de las mediciones no se han notado valores elevados de voltaje que indiquen que se ha desencadenado la corrosión del acero, lo que se debe al corto tiempo que se lleva aplicando el ensayo.
4. En el punto de vista de la Macroelda se puede concluir, que los hormigones con ARE demoran un mayor periodo de tiempo en absolver las soluciones liquidas colocadas en la superficie con respecto a los hormigones con ARSE.
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 similares, lo que significa que hasta este momento de la medición el recubrimiento no influye.

Recomendaciones

1. Se recomienda hacer estudios más detallado con respecto a la corrosión en los hormigones con áridos reciclados y la influencia que tiene la fracción encapsulada.
2. 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.
3. Continuar las mediciones en dichos especímenes para determinar el tiempo real en que se desencadena la corrosión empleando el mismo método del presente trabajo y por un periodo de tiempo más amplio.

Bibliografía

Arbolaez, G. and A. Estrella (2017). Montaje del protocolo de la Macroelda para evaluar, en tiempo real, la corrosión del acero de refuerzo en hormigones fabricados con cemento LC3-50, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil.

ARENAS, M. D. C. M. (2012). Materiales sostenibles en la edificación: residuos de construcción y demolición, hormigón reciclado.

Bello, P. M. (2013). Determinación de la Velocidad de Corrosión en Armaduras Mediante Técnicas Cuantitativas de Análisis Electroquímico. Ingeniería de Edificación, Universidad Politécnica de Valencia.

Bermúdez Odriozola, M. Á. (2007). Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida, Caminos.

Broomfield, J. P. (1997). Corrosion of steel in Concrete. London and New York, E and FN Spon.

del Valle Moreno, A., et al. (2001). "El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado." Publicación técnica(182).

Elsener, B., et al. (2003). "Hall-cell potential measurements—Potential mapping on reinforced concrete structures." Materials and structures **36**(7): 461-471.

Etxeberria Larrañaga, M. (2004). Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete, Universitat Politècnica de Catalunya.

Etxeberria, M., et al. (2007). "Recycled aggregate concrete as structural material." Materials and structures **40**(5): 529-541.

Fomento, M. (2008). "Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08." Fomento, Madrid, España.

Giner-Juan, F. (2009). Carbonatación vs. Aluminosis. Proceedings of the 'V Convención Técnica y Tecnológica de la Arquitectura Técnica', ContART 2009, Albacete-Spain: 25-27.

González, J. A. and J. M. Miranda (2007). "Corrosión en las estructuras de Hormigón Armado: fundamentos, medida, diagnosis y prevención."

Kobayashi, S. and H. Kawano (1988). "Properties and usage of recycled aggregate concrete." Demolition and reuse of concrete and masonry(2): 550.

López Gayarre, F. (2008). Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas.

NC_120 (2014). Hormigón Hidráulico. Especificaciones.

Paredes, J., et al. (2013). Corrosión del acero en elementos de hormigón armado: vigas y columnas, SPOL.

Pavon de la Fe, E., et al. (2010). Empleo del arido reciclado de hormigon en la fabricacion de hormigon estructural, e-libro, Corp.

Pérez Benedicto, J. Á. (2011). Estudio experimental sobre propiedades mecánicas del hormigón reciclado con áridos procedentes de la no calidad en prefabricación, *Arquitectura_Tecnica*.

Saez Cereijo, C. (2010). "Caracterización mecánica de hormigones con alto contenido en finos."

Sánchez de Juan, M. (2004). Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural, *Caminos*.

Sánchez de Juan, M., et al. (2010). "Conclusiones sobre reciclado de residuos de construcción y demolición como áridos para hormigones no estructurales." En publicación. Ihobe.

Sohail, M. G., et al. (2013). "Significance of macrocell corrosion of reinforcing steel in partially carbonated concrete: numerical and experimental investigation." Materials and Structures.

Tertre, J. I. (2007). "Gestión de residuos de construcción y demoliciones. Áridos reciclados." Informes de la Construcción **59**(505): 81-87.

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**.

Ulloa Mayorga, V. A. "Durabilidad de hormigones armados, con árido reciclado: Una evaluación de la corrosión en un ambiente marino."

Vazquez, E., et al. (2006). "Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural." Monografía M-11 ACHE, Madrid.

Vidaud, E. and I. VIDAUD (2012). "La carbonatación en el concreto reforzado." CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA EN CONCRETO. Pág: 21-23.

Villanueva, M. L. (2012). La carbonatación en el concreto reforzado. IMCYC. Mexico: 4.

Anexos

Datos técnicos del metro.



Data Sheet

5XP-A Digital Multimeter

A compact full-purpose multimeter.

The Amprobe 5XP-A digital multimeter provides superior features and accuracy in a smaller form factor. The 5XP-A has unique features such as VolTect™ non-contact voltage (NVC) detection and our exclusive Magne-Grip™ holster that frees both hands for work. The 5XP-A is the right choice for residential, commercial and general troubleshooting applications.



5XP-A Digital Multimeter

Data Sheet

General Specifications

Display	3-1/2 digit liquid crystal display (LCD) with a maximum reading of 1999
Polarity	Automatic, positive implied, negative polarity indication
Overrange	(OL) or (-OL) is displayed
Low Battery Indication	The "⚡" is displayed when the battery voltage drops below the operating level
Measurement Rate	2.5 times per second, nominal
Operating Environment	0 °C to 50 °C at <70 % R.H.
Storage Temperature	-20 °C to 60 °C, 0 to 80 % R.H. with battery removed from meter
Accuracy	Stated accuracy at 23 °C ± 5 °C, <75 % relative humidity
Temperature Coefficient	0.1 x (specified accuracy) per °C (0 °C to 18 °C, 28 °C to 50 °C)
Altitude	2000 m (6561.7 ft)
Power	Single standard 9 volt battery, NEDA 1604, JIS 006P, IEC 6F22
Battery Life	200 hours typical with carbon-zinc
Dimensions (H x W x D)	155 mm x 72 mm x 32 mm (6.1 in x 2.8 in x 1.3 in)
Weight	Approx. 210 g (7.4 oz) including battery
Warranty	One-year

Specifications

Function	Range	Accuracy
Voltage		
DC Volts		
Ranges	200 mV, 2 V, 20 V, 200 V, 1000 V	$\pm (1.0 \% \text{ rdg} + 1 \text{ dgt})$
AC Volts (45 Hz to 500 Hz)		
Ranges	200 mV, 2 V, 20 V, 200 V, 750 V	$\pm (1.5 \% \text{ rdg} + 5 \text{ dgt})$
Resolution	100 μV	
Input Impedance	10 M Ω	
Overload Protection	200 mV: 1000 V DC or 750 V AC RMS (3 minutes)	
	All other ranges: 1000 V DC or 750 V AC RMS	
Current		
DC Current		
Ranges	200 μA , 2 mA, 20 mA, 200 mA	$\pm (1.5 \% \text{ rdg} + 1 \text{ dgt})$
AC Current (45 Hz to 500 Hz)		
Ranges	200 μA , 2 mA, 20 mA, 200 mA	$\pm (2.0 \% \text{ rdg} + 5 \text{ dgt})$
Resolution	0.1 μA	
Input Protection	315 mA/1000 V fast blow ceramic fuse 6.3 mm x 32 mm on mA input	
Burden Voltage	300 mV max. (1 V max. on 200 mA range)	
Resistance		
	200 Ω , 2 k Ω , 20 k Ω , 200 k Ω	$\pm (1.0 \% \text{ rdg} + 4 \text{ dgt})$
	2 M Ω	$\pm (1.5 \% \text{ rdg} + 4 \text{ dgt})$
	20 M Ω	$\pm (2.0 \% \text{ rdg} + 5 \text{ dgt})$
Resolution	100 m Ω	
Open Circuit Voltage	0.3 V DC typical. (3.0 V DC on 200 Ω range)	
Overload Protection	1000 V DC or 750 V AC RMS	
Continuity		
Audible Indication	75 Ω	$\pm 25 \Omega$
Response Time	100 ms	
Overload Protection	1000 V DC or 750 V AC RMS	

A continuación, se muestran los gráficos que comparan recubrimientos, tipo de áridos soluciones liquidas empleadas.

