

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FC**  
Facultad de  
Contrucciones

**Departamento Ingeniería Civil**

## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Título:** Evaluación de la durabilidad de especímenes de hormigón con áridos reciclados encapsulados frente a la migración de cloruros.

**Autor:** Amanda Angélica Aguilar Acevedo

**Tutores:** 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*

El camino es el que nos enseña la mejor forma de llegar y nos enriquece mientras los estamos cruzando.

Paulo Coelho.

## *DEDICATORIA*

A mis padres:

Las personas que me dieron la vida y me han llevado de la mano y jamás me han dejado sola, y cuando me he caído ahí han estado para levantarme y limpiar mis rodillas. Les debo este logro por todo su esfuerzo, dedicación, paciencia y confianza en que lo alcanzaría. Al cabo de tantos años puedo regalarles algo que los llene de orgullo y alegría sabiendo que todo este tiempo empleado no ha sido en vano.

## *AGRADECIMIENTOS*

Son muchas las personas que han puesto su granito de arena en todos estos años, tanto familia, amigos, compañeros, profesores, serían muchos para mencionar y siempre se quedará alguno. Por eso no menciono nombres, todos de una forma u otra siempre les he hecho saber cuánto han significado en mi vida en todos estos años, unos están y otros se fueron ya pero desde la distancia les llegará mi agradecimiento porque fueron importantes.

*Gracias....*

## *RESUMEN*

Reciclar genera actividades que no dañan al medio ambiente por lo que tiene ventajas ecológicas y reduce la explotación de recursos renovables que se encuentran en agotamiento. Es una alternativa para la elaboración de hormigón en la construcción de estructuras con este nuevo hormigón pero puede afectar su durabilidad como su vida útil. Factores como la corrosión y la migración de cloruros son causas que afectan a la estructura con hormigón elaborado con áridos reciclados. En el siguiente trabajo se evalúa la durabilidad de hormigones elaborados con 100% de árido reciclado encapsulado en la fracción de 5-9 mm con PZ, con respecto a hormigones elaborados con 100% de árido natural ambos amasado con P35 y colocados en tres diferentes sitios de exposición. Luego de realizado los ensayos se concluye el árido natural tiene un comportamiento superior que los hormigones elaborados con áridos reciclados pero no deja de ser una alternativa viable.

## *ABSTRACT*

Recycling generates activities that do not harm the environment, so it has ecological advantages and reduces the exploitation of renewable resources that are depleted. It is an alternative for the manufacture of concrete in the construction of structures with this new concrete but it can affect its durability as well as its useful life. Factors such as corrosion and the migration of chlorides are causes that affect the structure with concrete made from recycled aggregates. In the following work the durability of concretes elaborated with 100% of recycled aggregate encapsulated in the fraction of 5-9 mm with PZ is evaluated, with respect to concretes made with 100% of natural aggregate both kneaded with P35 and placed in three different sites of exposition. After the tests were completed, the natural aggregate has a higher performance than the concretes made with recycled aggregates but it is still a viable alternative.

Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo I: Durabilidad de hormigones producidos con 100 % de áridos reciclados. Efectos de aplicar la técnica de encapsulamiento de la fracción de 5-9 mm .....	6
1.1 Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Definiciones y conceptos. ....	6
1.1.1 Tratamiento a los áridos reciclados a escala mundial.....	7
1.1.2 Tratamiento de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en Cuba.....	8
1.2 Hormigones con áridos reciclados .....	9
1.2.1 Propiedades de los áridos reciclados .....	10
<b>Absorción</b> .....	10
<b>Granulometría</b> .....	10
<b>Porosidad</b> .....	11
<b>Forma y textura</b> .....	11
<b>Resistencia a la abrasión</b> .....	11
<b>Densidad</b> .....	11
<b>Porcentaje de finos</b> .....	12
1.2.2 Propiedades del hormigón con áridos reciclados en estado fresco.....	12
<b>Consistencia</b> .....	12
<b>Densidad</b> .....	13
<b>Aire ocluido</b> .....	13
<b>Compacidad</b> .....	13
<b>Docilidad</b> .....	13
1.2.3 Hormigón reciclado en estado endurecido.....	14
<b>Densidad</b> .....	14
<b>Resistencia a compresión</b> .....	14
<b>Resistencia a tracción</b> .....	15
<b>Resistencia a flexo-tracción</b> .....	15
<b>Resistencia a cortante</b> .....	15
<b>Módulo de elasticidad</b> .....	16
<b>Retracción por secado</b> .....	16
<b>Fluencia</b> .....	17
<b>Velocidad del pulso ultrasónico</b> .....	17
1.3 Durabilidad de Hormigón con áridos reciclados .....	17
1.3.1 Comportamiento del hormigón con áridos reciclados ante el impacto de cloruros: .....	18

## Índice

1.3.2 Ensayos para medir la durabilidad en hormigones: .....	20
<b>Resistividad Superficial</b> .....	20
<b>Ensayo de STADIUM</b> .....	22
1.4 Ventajas y desventajas del uso de áridos reciclados en la fabricación de hormigones ....	22
1.4.1. Ventajas.....	22
1.4.2. Desventajas .....	23
Capítulo II: Desarrollo experimental en especímenes de hormigón con árido reciclado y árido natural ante el impacto de cloruros. ....	24
2.1. Generalidades .....	24
2.2. Sitio de exposición Punta Matamoros (Cayo Santa María).....	25
2.2.1. Sitio de exposición Sede Universitaria (Cayo Santa María).....	26
2.2.3 Sitio de exposición Facultad de Construcciones (Universidad).....	26
2.3.1. Resistividad Eléctrica .....	27
2.3.2. Resistencia a la penetración del ion cloruro por la norma ASTM C 1202 .....	29
Procedimiento desarrollado.....	33
2.4.1. Extracción de especímenes.....	36
2.4.2 cortes de los especímenes. ....	37
2.4.4 2.4.3 saturación y en la saturación al vacío de los especímenes .....	38
2.4.5 Migración de iones cloruros (ASTM C 1202). ....	38
2.4.6. Materiales y reactivos .....	39
2.4.7 Medios de protección utilizados.....	39
Cap. III. Análisis de los resultados obtenidos. ....	40
3.1. Diseño del plan experimental. ....	40
3.2. Determinación de la resistencia de los especímenes. ....	41
3.3. Determinación de la resistividad superficial .....	43
3.4. Perfil visual de cloruro.....	49
3.5. Resultados de migración de cloruros. ....	53
3.6. Resultados de STADIUM.....	58
Conclusiones Parciales. ....	60
CONCLUSIONES GENERALES. ....	61
Recomendaciones .....	62
Bibliografía .....	63
ANEXOS .....	66

2018

Sede Cayo Santa María						
Elemento	Resistividad (kΩ)	Temperatura	Corrección (kΩ)	Resistividad Media	Promedio	Desv. Estandar
100% NAC SEDE Cayo Santa María	33.1	25.5	39.6	39.3	34.3	2.761208506
	31.3	25.5	37.5			
	30.8	25.5	36.9			
	35.9	25.5	43.0			
100% NAC SEDE Cayo Santa María	24.1	25.5	28.9	29.4	34.3	0.529976768
	24.9	25.5	29.8			
	24.3	25.5	29.1			
	25	25.5	29.9			
100% RAC 2016 (enc. with 51kg/m³) SEDE 1	9.4	25.5	11.3	10.7	11.1	0.44138412
	9	25.5	10.8			
	8.5	25.5	10.2			
	9	25.5	10.8			
100% RAC 2016 (enc. with 51kg/m³) SEDE 2	9.2	25.5	11.0	11.5	11.1	0.573309645
	9.6	25.5	11.5			
	10.3	25.5	12.3			
	9.4	25.5	11.3			
100% RAC 2017 (enc. with 60kg/m³) SEDE	6.8	25.5	8.1	7.9	7.7	0.246892552
	6.5	25.5	7.8			
	6.4	25.5	7.7			
	6.8	25.5	8.1			

## **INTRODUCCIÓN**

El continuo desarrollo de la humanidad a lo largo de los años ha provocado un incremento en las actividades productivas, las cuales han tenido que desarrollarse a ritmos acelerados para sostener las demandas de la creciente población. El costo de esta realidad se ha traducido en una explotación ininterrumpida y creciente de los recursos del planeta, sean estos renovables o no. La gran demanda de recursos básicos ha generado una gran escasez de materias primas, constituyendo una gran preocupación. A lo anterior, se suma la nueva motivación de la que el mundo ha sido protagonista: preservar y proteger el medio ambiente de un inminente desequilibrio ecológico y convirtiéndose la construcción en la esfera más importante de la sociedad. (Ruíz, 2005)

La conservación de los recursos naturales ha impulsado el reciclaje como un proceso recuperador que logra actividades sin dañar al medio ambiente. En el caso de la construcción con hormigón, se requiere un volumen de recursos importante, especialmente en agregados pétreos. La necesidad de obtener áridos compatibles con los requerimientos de la fabricación de hormigón, ha llevado a la explotación masiva de canteras y lechos de ríos donde es posible encontrar material de buena calidad. (Covarrubias, 2017)

El reciclado de hormigón tiene como objetivo transformar los materiales de un hormigón antiguo en componentes de un nuevo hormigón. Su implementación no sólo ha permitido eliminar en parte el costo de los áridos (incluyendo también los costos de traslado del material), sino también ha eliminado los requerimientos de un botadero donde disponerlos trozos de hormigón inservible. Los volúmenes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) producidos a nivel internacional constituyen un elevado por ciento del total de los residuos generados por la sociedad. (Ruíz, 2005)

Los expertos estiman que aproximadamente 20% del árido usado actualmente podría técnicamente ser reemplazado por árido reciclado, es posible decir que el reciclaje del hormigón se ha vuelto en una alternativa económica y ambiental de gran valor e interés a pesar que las propiedades resistentes de un hormigón de árido reciclado son menores que las de un hormigón de árido natural, aun conservando idénticas dosificaciones y granulometría. (Barra, Aponte, H, Vallo, & Vazquez, 2011)

## *Introducción*

### **Situación problemática:**

Producto de este alto contenido de RCD y el elevado consumo de recursos naturales se vio la necesidad de implementar un nuevo método para disminuir la explotación de los recursos naturales utilizados como materia prima en la producción del hormigón. Esta técnica es el reciclado de hormigón que consiste en volver a utilizar los hormigones producto de demoliciones de edificaciones en mal estado y plantas de hormigón. El empleo de esta técnica reduce considerablemente el empleo de los áridos naturales ya que estos constituyen el 75 % del volumen total en la producción de hormigones. (Delestrac, 2013)

Debido a la alta porosidad presente en el mortero adherido a los áridos reciclados, aumentan la demanda de agua y la porosidad del hormigón hecho con este material. Por esta razón se aplicó el método de encapsulación que consiste en recubrir los áridos con una fina capa de cemento la cual lleva a una densificación de la estructura porosa. Esta capa de cemento actúa como un escudo de protección y evita que el agua sea absorbida por la estructura porosa. Por otra parte la zona intermedia entre la fina capa de cemento y los agregados obtienen mejoras. (Martirena, 2015)

Como solución a estas propiedades físicas de los áridos reciclados se desarrollan actividades para su mejor utilización al elaborar hormigones para alcanzar una mayor resistencia como son:

- Mejora mecánica mediante técnicas de trituración para eliminar la mayor parte del mortero adherido
- Mejora química a través de la implementación de cambios en la estructura micro superficial del agregado

En Cuba se realizan varias investigaciones donde se encuentra el Centro de Investigación y Desarrollo de Materiales de Construcción (CIDEM) el cual está asociado con la Universidad de ciencias y técnicas en Karlsruhe, trabajando el tema de la encapsulación del árido reciclado y con esta investigación se evaluara la durabilidad de especímenes realizados en años anteriores.

Teniendo en cuenta la situación problemática anteriormente expuesta se define como

### **Problema científico:**

¿Cómo influye la técnica de encapsulación de la fracción 5-9 mm del árido reciclado en la resistencia a la penetración de iones cloruro en hormigones producidos con esta técnica?

## *Introducción*

### **Hipótesis:**

Con el encapsulamiento de los áridos reciclados se obtienen hormigones de adecuado comportamiento en términos de durabilidad, frente a distintos niveles de agresividad.

### **Objeto de investigación**

- Evaluación de la durabilidad en especímenes de hormigón con 100% de áridos reciclados, con fracción 5-9 mm encapsulada con cemento PZ, en hormigones elaborado con cemento Portland de 35 MPa de resistencia a compresión.
- Evaluación de la durabilidad en especímenes de hormigón con 100% de áridos reciclados en hormigones elaborado con cemento Portland de 35 MPa de resistencia a compresión.
- Evaluación de la durabilidad en especímenes de hormigón con 100% de áridos naturales en hormigones elaborado con cemento Portland de 35 MPa de resistencia a compresión.

### **Campo de Acción**

Evaluación de la durabilidad del hormigón elaborado con áridos reciclados encapsulados expuestos a ambientes de diferentes condiciones de agresividad.

### **Objetivo general**

Evaluar la durabilidad ante la penetración de iones cloruros de especímenes de hormigón elaborado con áridos reciclados encapsulados en diferentes condiciones de agresividad.

### **Objetivos específicos:**

- Analizar la durabilidad de los especímenes en cuanto a migración de iones cloruro, en correspondencia con las Normas Cubanas e internacionales.
- Comparar de los resultados obtenidos entre los diferentes especímenes.
- Evaluar los resultados ante su comportamiento por el tiempo expuesto a medio con los resultados obtenidos en años anteriores.

### **Tareas técnicas:**

- Revisión bibliográfica acerca de la durabilidad del hormigón con áridos reciclados mediante el encapsulamiento de los mismos.

## *Introducción*

- Obtención de testigos: NC 318: 2003 Hormigón endurecido — Extracción y preparación de testigos cilíndricos (ASTM C42-94, MOD) en los diferentes sitios de exposición
- Preparación de las muestras para ser evaluadas según el protocolo de ensayos ASTM.
- Realización del ensayo ASTM C1202.
- Realización del ensayo de STADIUM.
- Realización del perfil visual de cloruros (Nitrato de plata).
- Evaluación de los resultados obtenidos.
- Comparación de los resultados de los distintos hormigones
- Comparación de los resultados con los obtenidos años anteriores.

## ***Aportes esperados***

### Práctico

- Sustitución de recursos naturales por áridos reciclados lo cual disminuye la explotación de canteras.
- Evaluación de las propiedades de durabilidad del hormigón con áridos reciclados y naturales.
- Análisis de la influencia del encapsulamiento de los áridos reciclados en la durabilidad del hormigón.
- Comparación de los resultados obtenidos entre las muestras extrídas de los diferentes sitios de exposición.

### Metodológico

Utilización de una metodología de ensayos de durabilidad basado en la utilización de sitios de exposición en diferentes condiciones reales de agresividad atmosférica.

## ***Estructura del Trabajo***

### **Capítulo I:**

Durabilidad de hormigones producidos con 100% de áridos reciclados. Efectos de aplicar la técnica de encapsulamiento de la fracción de 5-9mm.

### **Capítulo II:**

Desarrollo experimental en especímenes de hormigón con árido reciclado y árido natural ante el impacto de cloruros.

## *Introducción*

### **Capítulo III:**

Análisis de los resultados obtenidos.

### **Conclusiones:**

Conclusiones técnicas de los resultados obtenidos en cuanto a áridos reciclados y naturales en diferentes condiciones de agresividad

**Capítulo I: Durabilidad de hormigones producidos con 100 % de áridos reciclados. Efectos de aplicar la técnica de encapsulamiento de la fracción de 5-9 mm**

**1.1 Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Definiciones y conceptos.**

La construcción genera un alto consumo de áridos los cuales con el transcurso de los años se encuentran en una fase de agotamiento, así mismo un gran número de canteras se encuentran totalmente agotadas. Los llamados RCD (Residuos de la Construcción y Demolición) ayudarían en gran medida a resolver esta problemática existente a nivel mundial. (Castaño, 2013)

La utilización de RCD de hormigones provenientes de demolición de edificios o infraestructuras se ha venido utilizando en su gran mayoría en bases y sub-bases de carreteras, en rellenos, drenajes, camas de asiento de tuberías y hormigón en masa. (Pérez, 2013)

Se aconseja la utilización de árido reciclado procedente de hormigón convencional, se excluye el uso de árido reciclado en hormigón pretensado y se contempla la sustitución del árido grueso en cantidades no superiores al 20% sin necesidad de estudios y ensayos complementarios. (Calderón, 2014)

Los residuos de construcción y demolición (RCD) se generan en actividades propias de construcción, obra nueva, remodelación, rehabilitación o reforma, demolición o derribo de edificios o infraestructuras. Cada año, se generan en Europa 890.000.000 toneladas de RCD, de los cuales se reciclan, de media, un 50% (excluyendo tierras sin sustancias peligrosas). Esta cifra está muy lejos de los objetivos marcados por la Directiva Europea para el año 2020. Son en la actualidad una de las principales tipologías de residuos, en cuanto a volumen de generación, hasta el punto de ser superiores a los residuos municipales. (Merino M. d., 2016)

La legislación alemana ha impulsado la sustentabilidad en la industria de la construcción al exigir que un porcentaje de los residuos producto de las demoliciones sean reutilizados y reciclados en obras nuevas. La tasa de recuperación de estos residuos es muy alta y esta se debe en parte al valor agregado que tienen la alta calidad en material reciclado, energía, la mano de obra y los altos costos de eliminación de residuos. Los RCD se pueden clasificar según las propiedades de los mismos:

## *Capítulo I*

**Residuos inertes.** Aquellos que no presentan ningún riesgo de polución de las aguas y de los suelos y que, en general, podríamos asimilar a los materiales pétreos.

**Residuos no peligrosos.** Son los que por su naturaleza pueden ser tratados o almacenados en las mismas instalaciones que los residuos domésticos.

**Residuos peligrosos.** Los formados por materiales que tienen determinadas características perjudiciales para la salud o el medio ambiente. (Telmatzi, 2014)

### **1.1.1 Tratamiento a los áridos reciclados a escala mundial**

Se estima que en el mundo cada año se producen más de 6,5 mil millones de toneladas de RCD, de las cuales entre 2,6 -3 mil millones de toneladas corresponden a desechos inertes de la construcción y de la demolición. Se cree que desde el final de la 2ª Guerra Mundial, la acumulación de RCD en vertederos de todo el mundo alcanza a más de 1000 millardos de toneladas. La realidad del reciclaje a escala mundial oscila entre el 5-60% del total producido de RCD (dependiendo de cada país y región) en relación con el tratamiento de materiales reciclados. Éstos tienen un uso posterior como relleno en mezclas de hormigón o de asfalto, como cimientos y capas de protección de carreteras, así como para el relleno de redes de ingeniería, caminos forestales, paredes contra el ruido y como bases para construcciones ferroviarias. (Compañía Progotech Know-How, 2017)

Las estadísticas generales sobre el uso global de materiales de reciclado de RCD está en el promedio del 10%, el resto se almacena en depósitos y vertederos, principalmente como material de relleno en vertederos públicos. El producto final, la mezcla de hormigón, es desde el punto de vista de los costes al menos en un 70% más conveniente en base al precio normal del costo de los materiales de construcción producidos de manera tradicional en el mundo. (Compañía Progotech Know-How, 2017)

El contenido del cemento para la producción de mezclas de hormigón y de productos derivados del mismo es de alrededor del 30% menor que el contenido en la forma tradicional de producción del hormigón en base de agregados naturales. (Compañía Progotech Know-How, 2017)

En la Comunidad Europea se producen 461 millones de toneladas anuales de residuos en forma de desechos de construcción y de escombros de demolición (European Commission DG ENV, 2011). Hace algunos años, estos residuos se

## *Capítulo I*

Depositaban de forma habitual en escombreras ilegales o eran mal gestionados por personal no especializado. Sin embargo, cada vez más, se suelen extraer de forma separada gran parte de los materiales para poder ser reciclados, como el vidrio, la madera, el hierro, el aluminio, el cobre, el plomo, los plásticos o el cableado eléctrico. Los niveles de reciclaje y reutilización de RCD varían enormemente entre los Estados Miembros, desde el 14% de España, hasta el 98% de Holanda, 94% de Dinamarca, 92% de Estonia, 86% de Alemania, 80% Irlanda o 75% de Reino Unido, aunque el promedio de la EU-27 está en un 46% (European Commission DG ENV, 2011). (Muñoz & Agrela, 2012)

### **1.1.2 Tratamiento de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en Cuba.**

Conociendo las bondades que supone el uso de áridos reciclados de hormigón en Cuba, a saber: el ahorro de combustible por concepto de transporte, conservación de recursos no renovables y minimización de daños medio ambientales, se estudian las posibilidades de introducir en las normativas cubanas dichos materiales. Se realiza una caracterización de las principales plantas en el territorio central del país donde se justifica la necesidad de obtención de áridos reciclados. Se efectúa un análisis de las principales normativas internacionales (Estados Unidos y España) sobre el empleo de áridos reciclados y se vincula con la normativa vigente en nuestro país la norma cubana NC 175:2002 donde se propone un programa general para permitir el empleo de áridos reciclados en la normativa. (Herrera, 2012)

En el caso de la ciudad de Santa Clara existen varias empresas productoras de prefabricado ubicadas en la zona de desarrollo industrial vinculadas a la Empresa de Producciones Industrial de Villa Clara (EPI VC), estas son la UEB fábrica de traviesas Cuba 71, UEB Luis Ramírez López y la UEB IMS. Existe un alto ritmo de producción de los áridos en la provincia de Villa Clara. Esta situación es insostenible debido a que en un futuro no lejano puede peligrar su estabilidad por la carencia de recursos naturales no renovables. Esto implica la necesidad de proponer soluciones de materiales alternativos, que, aunque no sustituyan completamente a los áridos naturales, si ofrezcan una opción para atenuar esta situación. Son precisamente los áridos reciclados la respuesta a esta problemática. El Centro de Investigación y Desarrollo de Materiales de Construcción (CIDEM), perteneciente a nuestra Facultad de Construcciones de la Universidad Central de Las Villas, viene trabajando en el proyecto Árido Reciclado desde el 2011, en este tiempo se han desarrollado varios trabajos investigativos con el fin de incorporar los residuos de construcción y demolición como áridos en nuevos hormigones. (Fernández L. M., 2015)

## *Capítulo I*

Ha desarrollado una amplia experimentación en el uso de áridos reciclados de diferentes procedencias, que han dado como resultado un conjunto de alternativas para obtener hormigones estructurales de resistencia adecuada, pudiendo regirse por normativas internacionales como la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) donde principalmente recomienda restringir el contenido de árido grueso reciclado sólo al 20% en peso sobre el contenido total de árido grueso, también se recomienda tener presente la naturaleza de los áridos. En caso de sustituciones totales de árido grueso la densidad desciende entre 5-15% de la densidad de un hormigón convencional. Según la normativa española (EHE-08) el tamaño mínimo permitido es 4mm. La fabricación de áridos reciclados a partir de los RCD generados en las ciudades es una alternativa que permite proteger los recursos naturales, disminuyendo la explotación de las canteras, los costes de transporte y minimiza el impacto ambiental. (Fe P. d., 2012)

### **1.2 Hormigones con áridos reciclados**

El reciclaje es la actividad de utilizar un residuo en un proceso productivo y la ventaja más importante que tiene es que soluciona, a un mismo tiempo, la problemática originada por la eliminación de subproductos de desechos y que, mediante el aprovechamiento de estos residuos se obtiene una nueva materia prima, con lo que se reduce la cantidad de recursos naturales primarios a extraer. (Soto, 2008)

En todo el mundo, la industria de la construcción se considera una de las mayores consumidoras de recursos naturales tales como: áridos que son utilizados en la fabricación de cementos, morteros, hormigones, etc. Los áridos reciclados son el resultado de la gestión y tratamiento de los residuos de la construcción y demolición, que tras someterlos a un proceso de reducción de tamaño y cribado, y analizarlos en el laboratorio, cumplen con las especificaciones técnicas para una aplicación dada dentro del sector de la construcción y de la obra civil. (Monzón, 2013)

Las propiedades del hormigón reciclado pueden verse afectadas negativamente respecto a las de un hormigón convencional con la misma dosificación. El módulo de elasticidad y las resistencias pueden reducirse, y la retracción y fluencia pueden aumentar en comparación con hormigones de similares resistencias que contienen únicamente áridos naturales. En general la permeabilidad de los hormigones reciclados es más alta que la del hormigón convencional, tienen mayor capacidad de succión y resisten peor la exposición a temperaturas altas. Estas variaciones, debidas fundamentalmente al aumento de la cantidad de mortero adherido al árido, serán

## *Capítulo I*

mayores a medida que se aumente el porcentaje de sustitución de árido natural por árido reciclado. (Merino M. d., 2012)

### **1.2.1 Propiedades de los áridos reciclados**

#### ***Absorción***

La absorción de los áridos reciclados tiene una relación directa con la relación a/c del hormigón de origen. La absorción en los áridos reciclados alcanza valores muy superiores a los obtenidos en los áridos naturales debido a la cantidad de mortero adherido que presentan dichos áridos. El tamaño del árido reciclado influye de manera decisiva sobre la absorción. En las fracciones más finas la absorción es mayor, ya que en ellas la cantidad de mortero adherido es superior que en las fracciones más gruesas, siendo más acusada dicho efecto cuando menor sea la densidad del árido reciclado. (Benedicto, 2010)

En áridos naturales los valores de la absorción oscilan entre un 0% y un 4% mientras que en los diferentes estudios consultados los valores obtenidos en áridos reciclados van desde 3,3% hasta un 13% aunque, por lo general, la mayoría sobrepasan el valor límite de un 7% establecido por la Instrucción de Hormigón Estructural. (EHE -08). (Instrucción de hormigón estructural. EHE, 105/2008)

La absorción es una de las propiedades físicas del árido reciclado que presenta una mayor diferencia con respecto al árido natural, debido a la elevada absorción de la pasta que queda adherida a él. Los valores habituales de absorción están comprendidos entre 4-10%, incumpliendo en la mayoría de los casos el límite del 5% que establece la EHE. (Instrucción de hormigón estructural. EHE, 105/2008)

#### ***Granulometría***

La granulometría de los áridos reciclados varía según el proceso de trituración que se realice, pudiéndose seleccionar mediante pequeños ajustes en la apertura de las machacadoras. El porcentaje de árido grueso que se obtiene suele variar entre 70% y 90% el árido total producido. Este porcentaje depende además del tamaño máximo del árido grueso reciclado producido y de la composición del hormigón original. La fracción gruesa posee una curva granulométrica adecuada, que se puede englobar dentro de los usos granulométricos que recomiendan algunas normas internacionales para el empleo de árido grueso en hormigón estructural (ASTM, 2015)

## *Capítulo I*

### **Porosidad**

El árido reciclado tiene una alta porosidad, ya que tiene una elevada capacidad para adsorber agua. Estudios realizados al respecto han demostrado que la penetración de agua es de dos a tres veces superior a los áridos naturales. Varios estudios consultados plantean que la utilización de hormigones con densidades superiores a 2200 Kg/m<sup>3</sup>, dan como resultado áridos con una baja porosidad mejorando esto la calidad de los nuevos hormigones. (Benedicto, 2010)

### **Forma y textura**

El coeficiente de forma de las partículas se ve directamente afectado por el sistema de trituración empleado en la obtención del árido reciclado. Las machacadoras de mandíbulas proporcionan áridos reciclados con un coeficiente de forma más adecuado que las trituradoras de impactos o de conos. Las partículas de árido reciclado obtenidas suelen presentar una textura más rugosa y porosa que la de los áridos naturales debido a la presencia de mortero adherido a la superficie del árido origen. Estas circunstancias hacen que los hormigones que se fabriquen con ellos presenten problemas de trabajabilidad. (Arenas, 2012)

### **Resistencia a la abrasión**

El coeficiente de Los Ángeles en áridos reciclados presenta valores superiores debido a que en dicho ensayo no solamente se producen la correspondiente pérdida de peso del árido natural, sino también la derivada de eliminar la totalidad del mortero adherido. El hormigón del que proceden los áridos reciclados también influye en el valor obtenido en el ensayo observándose que, al aumentar la resistencia, el valor del coeficiente de Los Ángeles disminuye. (Arenas, 2012)

Según la bibliografía consultada este coeficiente de desgaste de los áridos en el uso para hormigón estructural está limitado.

### **Densidad**

La densidad del árido reciclado es menor que la del árido convencional ya que el primero presenta una capa de mortero adherido cuya densidad es inferior a la del árido natural. La fracción fina obtenida es la que menor densidad tiene debido a la mayor cantidad de mortero que poseen sus partículas por unidad de peso. (Benedicto, 2010)

La densidad en las fracciones más gruesas del árido reciclado es algo mayor que en las fracciones finas. Incluso en las mismas fracciones granulométricas, los resultados

## *Capítulo I*

presentan gran disparidad. Sin duda se debe a la distinta naturaleza de los áridos con los que se fabricaron los hormigones originales. Aun así puede concluirse que la densidad aumenta con el tamaño. (Arenas, 2012)

La densidad del árido reciclado es inferior a la del árido natural, debido a la pasta de cemento que queda adherida a los granos. La densidad del árido reciclado suele oscilar entre 2.100 y 2.400 kg/m<sup>3</sup>, mientras que la densidad saturada con superficie seca varía entre 2.300 y 2.500 kg/m<sup>3</sup>, por lo que en todos los casos se pueden considerar estos áridos de densidad normal (no ligeros), por presentar una densidad superior a 2.000 kg/m<sup>3</sup>, según establece la norma UNE 146.120:97 "Áridos para hormigones. Especificaciones". (UNE 146.120:97, 1997)

### **Porcentaje de finos**

El árido reciclado genera finos durante su manipulación debido a la aparición de pequeñas partículas de mortero que se desprenden. La generación de finos sobre fracciones gruesas ya clasificadas en el laboratorio puede variar entre 0,27% y 1,14%, situándose en la mayoría de los casos por debajo del límite del 1% del árido grueso establecido por la EHE. La presencia de partículas finas en la superficie del árido reciclado puede originar problemas de adherencia entre éste y la pasta de cemento, además de provocar un aumento en la cantidad de agua de amasado necesaria. Las recomendaciones o normas que incluyen especificaciones sobre esta propiedad establecen un límite más alto de finos para el árido reciclado, admitiendo entre un 2% y un 5%, favoreciendo así el cumplimiento de esta especificación. (Robas, 2008)

### **1.2.2 Propiedades del hormigón con áridos reciclados en estado fresco**

Las principales diferencias del hormigón reciclado con el hormigón tradicional, en cuanto a sus propiedades en estado fresco, están en la consistencia y en la densidad. Los valores más frecuentes de densidad encontrados en la bibliografía aparecen en el rango de 2100 a 2400kg/m<sup>3</sup> (Hernández, 2009), siempre menores a la densidad del hormigón hidráulico convencional fabricado con la misma dosificación, debido a que los áridos reciclados presentan una menor densidad que los áridos naturales.

### **Consistencia**

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

## *Capítulo I*

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 será tanto importante cuanto mayor sea el porcentaje de sustitución del árido. Como consecuencia se producirá una reducción de la relación agua-cemento efectiva y, por lo tanto, un aumento de la consistencia del hormigón fresco. (Benedicto, 2010)

### ***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/m<sup>3</sup> mientras que los áridos convencionales tienen unos valores de 2230 y 2410kg/m<sup>3</sup>. (Arenas, 2012)

### ***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)

### ***Compacidad***

La compacidad (C) es el cociente entre el volumen real (VR) y el volumen aparente (Va) del hormigón fresco. Representa el volumen de sólidos en una unidad de volumen.

El nivel de compacidad está relacionado con el nivel de huecos que existe en la mezcla. Un alto nivel de compacidad nos da un hormigón con un índice muy reducido de huecos en su granulometría. (Robas, 2008)

### ***Docilidad***

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

## *Capítulo I*

La presencia de finos favorece la manejabilidad de los hormigones, estimada mediante la medida de su consistencia y relacionada con la facilidad que poseen para la eliminación parcial o total del aire ocluido (Cereijo, 2010), la presencia de finos reduce la porosidad al rellenar los huecos que quedan entre los áridos grandes adaptando mejor así cualquier forma que se le quiera transmitir ya que por su forma y tamaño estos no quedan trabados.

### **1.2.3 Hormigón reciclado en estado endurecido**

El fraguado es la fase inicial de hidratación, y se caracteriza por el paso de la pasta en estado fluido al estado sólido, una vez se produce el fraguado es cuando podemos hablar de hormigón endurecido. A partir de este punto las reacciones de hidratación alcanzan los constituyentes del cemento que todavía no se han hidratado provocando el completo endurecimiento de la masa. Éste proceso se caracteriza por un progresivo desarrollo de las resistencias mecánicas. Aunque hablemos de dos procesos separados (fraguado y endurecimiento) solo existe un único proceso de hidratación continuo. (Jorge Ramón Cruz García, Ramón Velázquez Yáñez, 2004)

#### ***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. En estudios realizados en nuestro país, el descenso de la densidad es prácticamente inapreciable cuando la sustitución del árido grueso es del 20%. Cuando la sustitución es del 50% 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%. (Benedicto, 2010)

#### ***Resistencia a compresión***

En general, la resistencia a compresión en los hormigones fabricados con áridos reciclados disminuye con respecto a lo convencionales, manteniendo en ambos la misma relación agua-cemento, siendo dicha disminución más significativa cuanto mayor sea el porcentaje de árido grueso sustituido. Las posibles causas de dicha disminución pueden darse por diversos motivos.

1. El primero, por la cantidad de mortero adherido a la matriz rocosa produciendo una menor resistencia mecánica del árido reciclado con respecto al árido natural.
2. Otra de las causas es el aumento de zonas débiles en la masa de hormigón endurecido, debido a que la superficie de contacto entre el árido natural y el mortero adherido que

## *Capítulo I*

lleva se suma la superficie de contacto, más débil aún, existente entre los áridos reciclados y el mortero nuevo.

3. Este aumento de zonas débiles en la masa de hormigón endurecido también se ve influenciado por el aumento de aire ocluido en el hormigón reciclado. La ausencia de superficie de contacto entre algunas zonas produce el debilitamiento con respecto a los hormigones convencionales. (Jorge Ramón Cruz García, Ramón Velázquez Yáñez, 2004)

### ***Resistencia a tracción***

Lo estudios consultados proporcionan valores dispersos en la resistencia a tracción indirecta de los hormigones reciclados. Dichas variaciones pueden producirse al utilizarse áridos reciclados con distintas calidades para la fabricación de hormigón reciclado. Las pérdidas de resistencia a tracción son muy pequeñas cuando el porcentaje es inferior al 50%, tanto sustituyendo árido. (Alaejos, 2008)

### ***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 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% en algunos estudios, 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). Cuando la sustitución es del 100% los valores van desde 6% hasta el 32% en el caso de árido grueso, en el caso del árido fino su valor es del 30%.

### ***Resistencia a cortante***

La disminución de la resistencia a cortante, según los estudios consultados, 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.

Otros autores 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 establecen un buen comportamiento a cortante del hormigón reciclado con sustituciones del 50% del árido grueso. (Arenas, 2012)

## *Capítulo I*

### ***Módulo de elasticidad***

Cuanto mayor sea el módulo de elasticidad del árido total y su proporción en la que se mezclen con los demás componentes, más alto será el valor del módulo de elasticidad del hormigón fabricado con ellos. El módulo de elasticidad de la pasta que envuelve los áridos reciclados es inferior al del árido natural y al del hormigón. Debido a esta circunstancia, los áridos reciclados presentaran un módulo de elasticidad inferior al de los áridos naturales y, por consiguiente, el módulo de elasticidad del hormigón reciclado será inferior al del hormigón convencional. (Alaejos, 2008)

El módulo de elasticidad se ve reducido debido a la textura superficial más rugosa de los áridos reciclados y las pequeñas micro fisuras que puede presentar el mortero adherido.

### ***Retracción por secado***

El fenómeno de retracción se describe como la disminución de volumen del hormigón con el tiempo, debido al cambio del contenido de humedad del hormigón y cambios físico-químicos. Este fenómeno es indeseable ya que es una de las principales causas que permite la fisuración.

La calidad del hormigón del que procede el árido reciclado influye en la retracción ya que, según estudios consultados, al presentar los áridos reciclado procedentes de hormigones de mayor resistencia mayor cantidad de mortero adherido, presentaran valores más elevados de la retracción que los hormigones de peor calidad en lo que, generalmente, y utilizando el mismo sistema de trituración presentan menor cantidad de mortero alrededor de la matriz rocosa del árido. Sin embargo, estudios posteriores realizados en Japón presentan resultados que rebaten la teoría anterior ya que en ellos la retracción por secado es menor cuando la cantidad de hormigón de origen, medida en términos de resistencia a compresión, es más elevada. (Arenas, 2012)

A mayor tamaño máximo del árido será la retracción ya que se necesitará una cantidad menor de pasta para la fabricación del hormigón. Por otra parte, al incorporar las fracciones mayores del árido menor cantidad de mortero adherido, la retracción también disminuye. Es indudable que los procesos de trituración empleados en la obtención del árido reciclado también tendrán influencia en la retracción del hormigón. Cuando mejor se lleven a cabo dichos procesos menor será la cantidad de mortero adherido que presente el árido reciclado y menor la retracción. (Arenas, 2012)

## Capítulo I

### **Fluencia**

La fluencia es el aumento de las deformaciones provocadas por una carga sostenida en el tiempo bajo condiciones de humedad relativa constante y en equilibrio en toda la muestra, y sin intercambio de humedad con el medio. El agua tiene un rol fundamental en el mecanismo de fluencia del hormigón. La magnitud de la función de fluencia depende en gran medida de la historia de secado, así como del contenido de humedad o de agua evaporable total. (Covarrubias, 2017)

La fluencia en hormigones elaborados con áridos reciclados es superior a la de hormigones con áridos naturales debido al mortero adherido presente en los áridos reciclados. Para sustituciones de árido reciclado por encima del 20%, la fluencia aumenta progresivamente al aumentar el porcentaje de árido reciclado. Así, como valor orientativo para un 100% de árido grueso reciclado, la fluencia será 1,25 veces la de un hormigón convencional. (Covarrubias, 2017)

### **Velocidad del pulso ultrasónico**

En los hormigones reciclados, en la medida que se incrementa el porcentaje de árido reciclado, disminuyen los valores de la velocidad de la onda ultrasónica, siendo por lo general inferiores, si se comparan con el hormigón convencional fabricado con la misma dosificación. Al igual que ocurre en la resistencia a compresión es posible encontrar para sustituciones pequeñas de árido natural por reciclado valores similares al hormigón convencional en esta propiedad.

<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Calidad</b>
>4.500	Excelente
3.600-4.500	Buena
3.000-3.600	Regular
2.100-3.000	Mala
<2.100	Muy Mala

**Tabla1.2.3: Criterios de calidad del hormigón en función de la velocidad de ultrasonidos.** (Martínez, 2011)

### **1.3 Durabilidad de Hormigón con áridos reciclados:**

La durabilidad del hormigón es la capacidad de comportarse satisfactoriamente frente a las acciones físicas o químicas agresivas y proteger adecuadamente las armaduras

## *Capítulo I*

y demás elementos metálicos embebidos en el hormigón durante la vida de servicio de la estructura.

La durabilidad del hormigón reciclado se va a ver afectada con respecto a la del hormigón convencional por la presencia de árido reciclado en su composición, el cual introduce un mayor volumen de poros y una pasta de distinta naturaleza a la del nuevo hormigón (Fe E. P., 2012)

La porosidad se define como la relación de poros de un material y su volumen aparente. En fenómenos asociados a la durabilidad del hormigón, habitualmente este concepto es interpretado no como el volumen total sino como el volumen de poros accesibles al agua, puesto que este es el que repercute en el ingreso de sustancias agresivas desde el exterior, y el volumen aparente de la muestra de hormigón. (Juan, 2004)

Los hormigones reciclados presentan una porosidad más elevada que la de los hormigones tradicionales debido a la mayor porosidad de los áridos reciclados, producida por la presencia de la pasta de cemento. (Juan, 2004)

La aparición de fisuras en la superficie del hormigón es una de las lesiones que se manifiestan producto de las reacciones álcali-árido. Los áridos reciclados pueden favorecer estas reacciones producto del mayor contenido de álcalis que aporta la pasta de cemento adherida, por tal motivo algunas recomendaciones de utilización. (Collins, 1998) lo consideran siempre potencialmente reactivo y recomiendan el empleo de adiciones puzolánicas en hormigones o cementos con adiciones, como cenizas volantes o humo de sílice, para evitar el problema en ambientes húmedos.

### **1.3.1 Comportamiento del hormigón con áridos reciclados ante el impacto de cloruros:**

La penetración de cloruros al hormigón es una de las causas esenciales de poner una construcción de hormigón en peligro a través de los daños de corrosión. Los cloruros pueden penetrar al hormigón por diferentes razones:

- Por las materias primas que se usa en la producción de hormigón pudiendo estar contenido en el amasado del hormigón con agua que contiene cloruros.

## *Capítulo I*

- Pueden ser transportadas por el aire a la superficie de estructuras que se encuentran en la línea costera y luego absorbidos por capilaridad. (Moreno, 2001)

Este proceso ocurre ya que aparece el componente electro-negativo (cloruro) el cual pertenece a las sales de ácido clorhídrico como por ejemplo NaCl y CaCl<sub>2</sub>, donde llega a ellas al ponerse en contacto con el agua disolviéndose y desintegrándose en iones. (Sark & Wicht, 2013)

El pH fuertemente básico del hormigón (aproximadamente 12,5) conduce a la formación de una película que sirve de protección a las armaduras y, en estas condiciones, se dice que el acero está "pasivado"; esto significa que aun en presencia de oxígeno y humedad, no se oxida. Los iones cloruro son capaces de "romper" esta película pasivante y dejar al acero sin protección, dado que forman un compuesto soluble, el cloruro ferroso (FeCl<sub>2</sub>) con los óxidos de hierro que constituyen el film. Una vez que se ha perdido la pasivación, el acero es susceptible de corroerse si están presentes todos los elementos necesarios: oxígeno, humedad y un medio (el hormigón) de baja resistividad eléctrica. (Pérez Pérez, 2016)

Sin embargo en caso de elementos de hormigón que no tengan armadura el efecto directo más nocivo por acción de cloruros en la mezcla de hormigón endurecido está constituido por la cristalización de las sales dentro de sus poros, la cual puede producir rupturas debidas a la presión ejercida por los cristales de sal. Este tipo de ataque se produce de manera más acentuada en el hormigón que no está permanentemente en contacto directo con el agua, pero la sal penetra y asciende por capilaridad, por lo que el ataque es más intenso cuando el agua o la humedad pueden penetrar en el hormigón. Debido a esto la permeabilidad de este material es un factor de gran importancia, por lo que el AR es más susceptible a ataques de cloruros que el hormigón convencional. (Pérez Pérez, 2016)

## Capítulo I

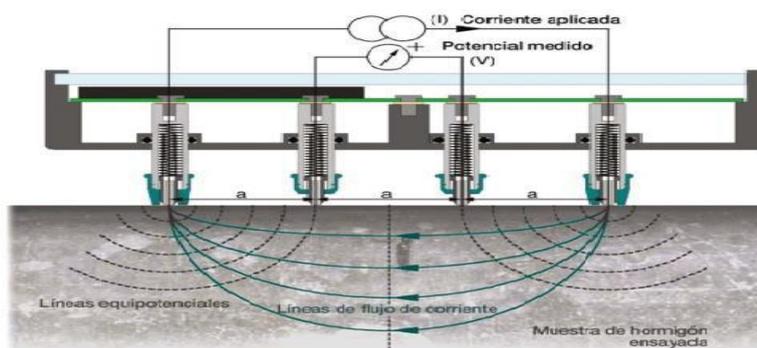
### 1.3.2 Ensayos para medir la durabilidad en hormigones:

#### **Resistividad Superficial:**

Andrade propuso en 2010 la resistividad eléctrica como propiedad del hormigón endurecido que, además de relacionarse con la velocidad de corrosión de armadura puede estimar el coeficiente de difusión del agresivo en su interior a partir de la ley de Nernst-Einstein, la cual relaciona conductividad y difusividad en condiciones de saturación del hormigón. Años más tarde Andrade propone un modelo de cálculo para la predicción de la vida útil basada en este indicador. (Andrade, Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic measurements. Cement and Concrete Residues 23: 724-74, 1993). La resistividad eléctrica inversa a la conductividad, se trata de una medida volumétrica de la resistencia eléctrica que mediante la ley de Ohm se expresa como la relación entre el voltaje y la corriente aplicada.



**Figura 1.3.2. Equipo para medir Resistividad Superficial.**



**Figura 1.3.3. Equipo para medir Resistividad Superficial.**

#### **Perfil visual de cloruros (Nitrato de plata)**

La aspersión de nitrato de plata ha sido utilizada asociada al ensayo acelerado de migración de cloruros prescrito por la ASTM C 1202/05. Es bien conocido que el medio

## Capítulo I

altamente alcalino que proporciona la matriz de cemento mantiene el acero presente en el concreto armado pasivo a la corrosión. Sin embargo, se pierde esta pasividad cuando los iones cloruro llegan a la armadura. La corrosión, entonces, es activada. el método colorimétrico basado en  $\text{AgNO}_3$  para la medición de la profundidad de penetración de cloruros en la matriz cementicia es práctico y consiste en un método cualitativo para identificar la presencia de cloruros libres en materiales a base de cemento (Real, 2015)



**Figura 1.3.4. Ensayo de Nitrato de Plata.**

### **Penetración de cloruros:**

Se realizó el ensayo de migración de los iones cloruros mediante la norma internacional ASTM C 1202, para lo cual se utilizó el equipo Rapid Chloride Permeability Tester, con los dos cortes de 55 mm realizados a los testigos. Este método fundamenta la determinación de la conductancia eléctrica del concreto para suministrar una rápida indicación de la resistencia de este elemento de hormigón a la penetración de iones cloruros. Este método es aplicable a tipos de hormigón donde las correlaciones han sido establecidas entre este procedimiento y el procedimiento a largo plazo de lagunas de cloruros.



**Figura 1.3.2 Equipo para la penetración de cloruros.**

## Capítulo I

### Ensayo de STADIUM

Versión modificada de la prueba de la ASTM C1202. Prueba estándar realizada en el hormigón, indica la habilidad de este para resistir la penetración de iones cloruros. Esta prueba consiste en monitorear la intensidad de corriente eléctrica que pasa a través de un espécimen experimental cilíndrico en un período experimental de 10-14 días. Al espécimen se le suministra un potencial eléctrico constante de una fuente externa de corriente. El paso de corriente se mide periódicamente durante todo el período de prueba. Si se desea monitorear la penetración de iones cloruros real se monitorea periódicamente la concentración de cloruro en la celda conectada al electrodo positivo.

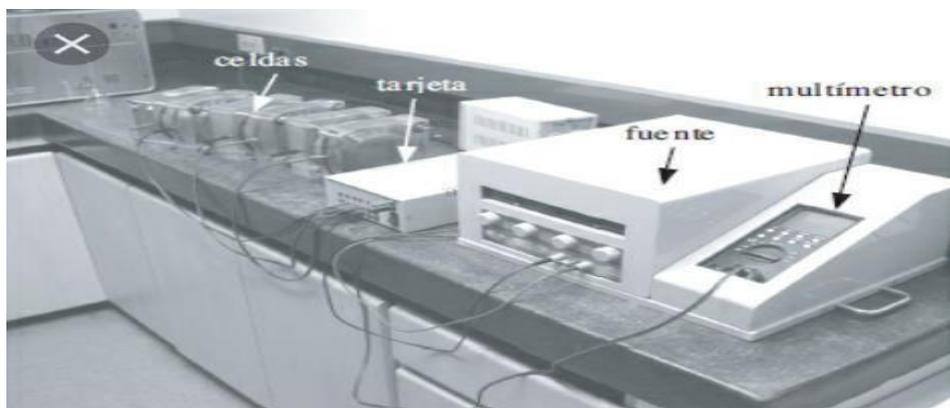


Figura 1.3.5. Equipo para migración de cloruros.

### 1.4 Ventajas y desventajas del uso de áridos reciclados en la fabricación de hormigones

#### 1.4.1. Ventajas

- Una de las ventajas más importantes que trae consigo el reciclado de los áridos es la reducción de los residuos y un óptimo reciclado.
- Otra de las notables ventajas es la disminución del área destinada a los escombros debido a la demolición de las estructuras de hormigón.

## *Capítulo I*

- Manejando los términos de desarrollo sostenible, se destaca la reducción del número de explotaciones necesarias para suministrar la materia prima original, con lo que disminuye el impacto ambiental. (Fernández C. C., 2015)

### **1.4.2. Desventajas**

- Generación de polvo, ruidos, y vibraciones producidas en las operaciones de tamizado y machaqueo en las plantas de procesado de los áridos
- El tiempo empleado para el estudio de las características del árido elaborado en el proceso de trituración.
- Las plantas fijas de reciclaje de áridos es conveniente situarlas en las proximidades de una planta de fabricación de hormigón.
- Posibles impactos sobre la salud, causadas por el inadecuado manejo y protección frente a componentes peligrosos que pueden existir en los residuos (particularmente en algunos de demolición), como el ambiente.

## **Capítulo II: Desarrollo experimental en especímenes de hormigón con árido reciclado y árido natural ante el impacto de cloruros.**

### **2.1. Generalidades**

El presente estudio es la continuación del trabajo desarrollado por la Ing. Beatriz Beltrán Alberdi. Para continuar este estudio se toman los valores obtenidos de su trabajo en el año 2017 y se los emplea como base para el desarrollo de la presente investigación.

En este capítulo se presenta la realización del desarrollo experimental empleado para la obtención de los resultados y la evaluación de la durabilidad de hormigones con áridos reciclados encapsulados y con áridos naturales ante la traspotación de los iones cloruros. Se describe las características de los materiales, la metodología desarrollada en los ensayos de migración de cloruros mediante el ASTM C1202 y la penetración de iones cloruros mediante el protocolo STADIUM, además del ensayo de la resistividad eléctrica superficial, perfil visual de cloruro (Ensayo de nitrato plata) los equipos e instrumentos a emplear en los mismos

Para darle cumplimiento a lo anterior se extraen testigos de hormigones producidos en los años 2016 (AN y ARE) y 2017 (ARE y AR sin encapsulación) los cuales están expuestos en diferentes sitios de exposición; Punta Matamoros, Sede Universitaria Cayo Santa María y Facultad de Construcciones en la Universidad Marta Abreu de las Villas. Los sitios de exposición están elegidos por su agresividad del medio según la tabla 2.16 de la NC 120: 2014.

*Tabla 2. 16: Agresividad del medio según exposición (NC 120 2014)*

Agresividad	Descripción
Muy alta	Estructuras situadas en las proximidades de la línea costera hasta 500 m del mar en la costa norte y hasta 100 m en la sur.
Alta	Estructuras situadas en la franja costera a más de 500 m y hasta 3 Km. del mar en la costa norte y a más de 100 m y hasta 1 Km. en la costa sur.
Media	Estructuras situadas en la franja costera a más de 3 Km. y hasta 20 Km. de la costa norte y a más de 1 Km. y hasta 20 Km. de la costa sur.
Baja	Estructuras situadas a más de 20 km. de ambas costas.

## Capítulo II

Una vez extraídos se trasladan los testigos al laboratorio de la Facultad de construcciones en la Universidad Central Marta Abreu de las Villas, donde se realiza las preparaciones necesarias para efectuar los ensayos pertinentes.

### 2.2. Sitio de exposición Punta Matamoros (Cayo Santa María).

Este es un sitio de exposición experimental de hormigones, que tiene por finalidad realizar ensayos a largo y mediano plazo permitiendo evaluar la durabilidad del hormigón, reuniendo los elementos necesarios para alcanzar resultados en ambiente marino en zonas de marea y salpicaduras.

Está ubicado en la región central de nuestro país, en la cayería norte de Villa Clara, en Punta Matamoros, Cayo Santa María municipio de Caibarién.(Brossard Pelegrin, 2014). Consta de dos plataformas de exposición con un área aproximada de 40 m<sup>2</sup> de superficie donde fueron expuestos bloques cilíndricos de hormigón. Esta zona corresponde a un nivel de agresividad muy alta. (NC 120: 2014)



Fig. 2.2. Sitio de exposición de Punta Matamoros, Cayo Santa María

## Capítulo II

### 2.2.1. Sitio de exposición Sede Universitaria (Cayo Santa María).

Está situada dentro de la propia Sede Universitaria en Cayo Santa María, en el municipio de Caibarién, Santa Clara, consta de una plataforma de 20 m<sup>2</sup> de superficie y responde a la condición de agresividad alta (NC 120: 2014).



Fig. 2.2.1. Sitio de exposición Sede Cayo Santa María.

### 2.2.3 Sitio de exposición Facultad de Construcciones (Universidad).

Espacio ubicado en las áreas verdes cercanas a la Facultad de Construcciones de la Universidad Central “Marta Abreu de Las Villas” ubicada en la Carretera a Camajuaní km 5, Santa Clara, se expondrán a un ambiente de agresividad baja permitiéndonos obtener información de los especímenes allí expuestos.



Fig. 2.2.3. Sitio de exposición Facultad de Construcciones.

## *Capítulo II*

### **2.3. Ensayos de la durabilidad de hormigones realizados en el estudio.**

#### **2.3.1. Resistividad Eléctrica.**

Este ensayo se realiza con el equipo Resipod, instrumento que se ha concebido para medir la resistividad eléctrica superficial de hormigón o rocas, funcionando con el principio de la sonda Wenner. Se aplica una corriente a dos sondas exteriores y se mide la diferencia de potencial entre las dos sondas interiores. La corriente es transportada por iones en el líquido en los poros. La resistividad calculada depende de la distancia entre las sondas.

Están a disposición dos versiones del Resipod:

- El modelo de una distancia entre sondas de 50 mm está en conformidad con la norma industrial aceptada.
- El modelo de una distancia entre sondas de 38 mm (1.5") está en conformidad con la especificación del método de prueba de resistividad superficial AASHTO.

Debido a la naturaleza no homogénea del hormigón, se prefiere una distancia entre sondas más grande ya que esto permite un flujo más homogéneo de la corriente de medición. Sin embargo, esto por lo general tiene que balancearse con la necesidad de evitar la influencia del acero de la armadura. La distancia de 50 mm típicamente es considerada un buen compromiso.

Una buena conexión entre el instrumento y la superficie de hormigón es el factor más importante para obtener una medición fiable. Sumergir los contactos en agua varias veces antes de ejecutar una medición; usar un recipiente poco profundo, de modo que se pueda presionar contra el fondo, con lo cual se llenarán los depósitos. Presionar el Resipod firmemente hacia abajo hasta que los dos capuchones de goma exteriores estén apoyados en la superficie que deberá ensayarse.

Las mediciones de resistividad podrán usarse para estimar la probabilidad de corrosión. Si la resistividad eléctrica ( $\rho$ ) del hormigón es baja, aumentará la probabilidad de corrosión. Si la resistividad eléctrica es alta (por ejemplo, en el caso de hormigón seco

## Capítulo II

y carbonatado), se reducirá la probabilidad de corrosión. Mediante pruebas empíricas se han obtenido los siguientes valores típicos para la resistividad medida, los cuales pueden ser usados para determinar la probabilidad de corrosión. Estos valores son válidos para cemento Portland corriente a 20°C.(Proceq, 2015).

Este ensayo conlleva la preparación previa de los especímenes los cuales se sumergen en una solución de cal con un pH de 12,5 por 48 horas para asegurar que la corriente sea conducida por los iones del líquido contenido en los poros. Al retirar las probetas de la solución se secan superficialmente y se procede a la medición con el aparato q cual debe ser humedecido antes de ponerse en contacto con el hormigón para una mejor conducción de la corriente. Se recogen cuatro mediciones perpendiculares las cuales se promedian para obtener el resultado. La temperatura a la cual se realiza este ensayo no debe sobrepasar los 21°C, de no ser así deberá realizarse la corrección de las mediciones, las cuales se ajustan mediante la siguiente fórmula:

$$va_{20} = va_{t} [1 - 0,03 \times (t - 20^{\circ}C)]$$

**Tabla 2.3.1: Estimación de la probabilidad de corrosión (Manual de operación Resipod Family)**

Lectura	Probabilidad
$\geq 100 \text{ k}\Omega\text{cm}$	riesgo de corrosión insignificante
= 50 a 100 $\text{k}\Omega\text{cm}$	bajo riesgo de corrosión
= 10 a 50 $\text{k}\Omega\text{cm}$	riesgo de corrosión moderado
$\leq 10 \text{ k}\Omega\text{cm}$	alto riesgo de corrosión

Lectura	Velocidad
> 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

Tabla 2.3.2: Velocidad de corrosión (Manual de operación Resipod Family)

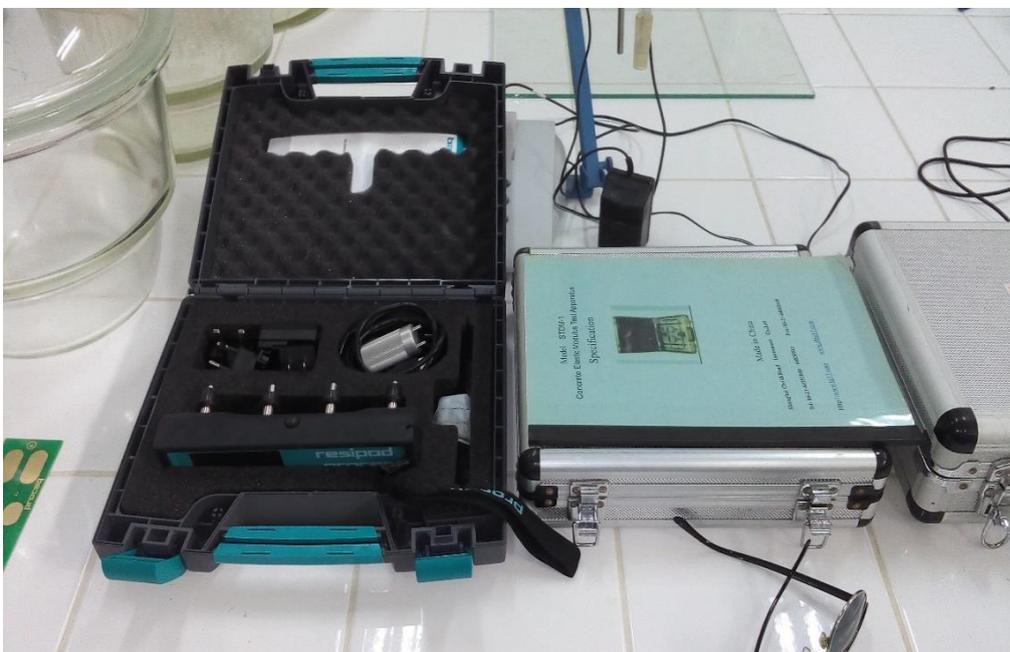


Fig. 2.3. Resipod, equipo utilizado para medir la resistividad eléctrica

### 2.3.2. Resistencia a la penetración del ion cloruro por la norma ASTM C 1202

El sistema se utiliza para evaluar la resistencia en el hormigón al ingreso de iones cloruros en dos maneras: determinando que tan fácil es forzar a los cloruros dentro de hormigón saturado por medio de la aplicación de un potencial eléctrico a través de un espécimen de prueba de acuerdo a la norma AASHTO T 277 o ASTM C 1202. Esto es conocido como la “Prueba Coulomb” o la “Prueba Rápida de Permeabilidad de Cloruros (Rapid Chloride Permeability Test, RC POT)”, o midiendo la profundidad de penetración de iones cloruro, después de haber aplicado un potencial eléctrico al espécimen

## *Capítulo II*

(Chloride Migration Coefficient from Non-Steady State Migration Experiments) para determinar el “Coeficiente de Migración de Cloruros”, el cual puede ser usado para estimar el coeficiente de difusión de cloruros para cálculos de estimación de vida. Para el caso de nuestro estudio estaremos utilizando el método que establece la ASTM 1202.(PROOVE'it, 2010).

Un espécimen saturado en agua, 100 mm de diámetro y 50 mm de espesor, es posicionado en una celda conteniendo una reserva de fluidos en ambos lados. Para el RCPOT o Prueba Coulomb, una reserva es llenada con una solución de 3% NaCl y la otra con solución 0.3N NaOH. Se aplica un potencial de 60 VCD a través de la celda. La terminal negativa se conecta en la reserva con NaCl y la terminal positiva se conecta a la reserva con NaOH. Los iones cloruros cargados negativamente migraran hacia la terminal positiva. Entre más permeable sea el hormigón, más iones cloruro viajaran a través del espécimen, y una mayor corriente será medida. La corriente es medida por 6 horas. Se determina el área bajo la curva contra el tiempo, la cual representa la carga total o el coulomb que pasaron a través del espécimen. Los valores de la cantidad de coulomb se utilizan para caracterizar el hormigón.(PROOVE'it, 2010).

Hay dos tipos de celdas disponibles, la PR-100 y la PR-1100, mostradas abajo. La PR-1100 es provista con rendijas enfriadoras las cuales son necesitadas si es requerido mantener la temperatura constante, como, por ejemplo, para migración de cloruros usando el método de prueba NT BUILD 492. La celda es sellada al apretar los cuatro pernos de las esquinas, lo cual presiona a los empaques contra el espécimen. Los siguientes empaques están disponibles para especímenes de diámetros diferentes: (104 a 102 mm: PR-1010A, 101 a 97 mm PR-1010B, 96 a 93 mm PR-1010C). Las celdas traen el empaque PR-1010B, a menos de especificar otro diámetro. Los empaques PR-1010B coinciden con el corazón de 100 mm de diámetro producido por el equipo de extracción de corazones CEL-100.

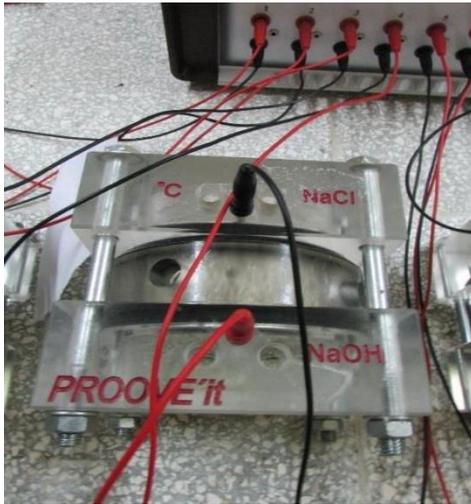


Fig. 2.5 celda (PR-100)

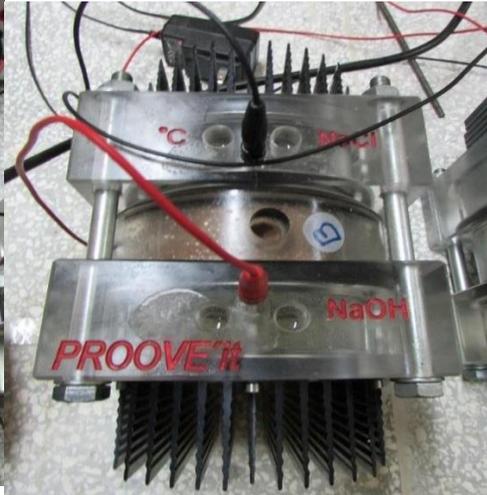


Fig. 2.6 celda (PR-1100)

La unidad de verificación PR-1055 es usada para verificar que la unidad de poder controlada por microprocesador este trabajando correctamente. La unidad es conectada a la línea de poder, 110 VCA o 220 VCA. Cada canal de la unidad de poder PROOVE'it es habilitada para ejecutar una prueba a un voltaje seleccionado y se conecta a la unidad de verificación. Cuando el sistema PROOVE'it está trabajando correctamente, la ventana "Current-Actual" debe registrar  $30 \pm 0.1$  mA o  $300 \text{ mA} \pm 0.1$  mA para las dos modalidades de la unidad de verificación.(PROOVE'it, 2010).



**Fig. 2.7 Unidad de verificación PR-1055(izq.) y unidad de poder PROOVE'it (der.)**

Durante el ensayo se determina la totalidad de la carga pasada, utilizándose ésta para la clasificación del hormigón según el criterio indicado en la Tabla Migración de cloruros basada en carga pasada (ASTM C1202)

## Capítulo II

Carga pasada	Migración de cloruros	Observaciones
>4,000	ALTO	Alta relación A/C (>0.60) convencional PCC
2,000–4,000	MODERADO	Moderada relación A/C (0.40–0.50) convencional PCC
1,000–2,000	BAJO	Baja relación A/C (<0.40) convencional PCC
100–1,000	MUY BAJO	Hormigón látex-modificado u hormigón internamente sellado
<100	DESPRECIALBE	Hormigón polímero-impregnado, hormigón polímero

**Tabla 2.3.2. Tabla Migración de cloruros basada en carga pasada (ASTM C1202)**

### 2.3.3. Protocolo STADIUM. Metodología Aplicada.

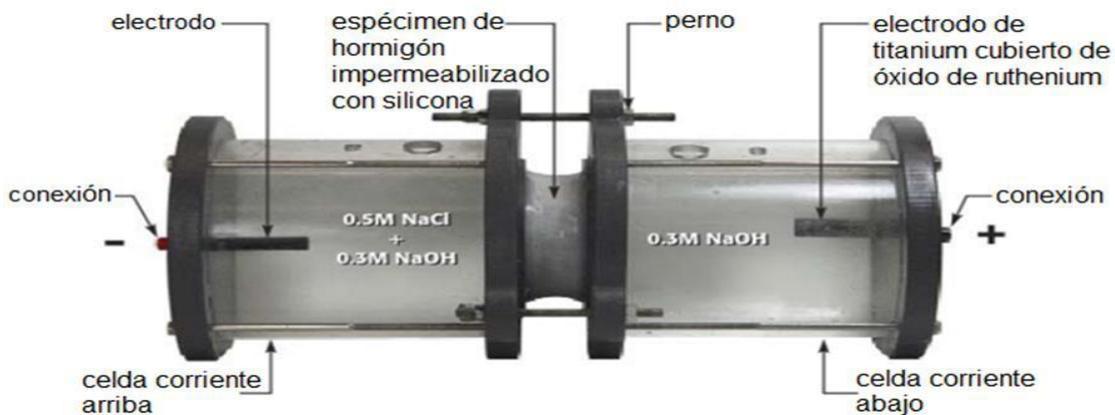
El protocolo STADIUM cuenta con tres métodos experimentales:

- Porosidad, estandarizado por la ASTM C642, ofrece resultados de densidad específica, absorción y el volumen de vacíos en el hormigón endurecido.
- Secado, versión modificada de la norma ASTM C1585, permitiendo obtener el coeficiente de transporte de humedad de los materiales cementicios, midiendo la pérdida masiva de agua debido a la evaporación y al transporte de humedad en los especímenes de hormigón.
- Migración de iones cloruro, versión modificada de la norma ASTM C1202.

En este último método experimental nos permite obtener el coeficiente de difusión y por tanto evaluar la resistencia del espécimen de hormigón ante la transportación de iones cloruros, midiendo la intensidad de la corriente que llega al electrodo positivo de la celda y la diferencia de potencial que ocurre en las caras del espécimen, mediante un

## Capítulo II

voltímetro digital por más de 3 días, el equipamiento consiste en dos celdas acopladas mecánicamente por tornillos que le dan el ajuste que las impermeabiliza, ya que dentro de la celda de arriba está la solución de 0.5 moles de cloruro de sodio (NaCl) + 0.3 moles de hidróxido de sodio (NaOH) y 0.3 moles de NaOH en la celda de abajo. En el centro entre estas dos celdas se encuentra el espécimen de hormigón sellado con silicona epóxica. En los extremos derecho e izquierdo de las celdas se encuentra la conexión de los electrodos con los cables que transmiten la carga de 19-21 V, es posible obtener la estabilidad en el voltaje del sistema por una fuente que convierte la corriente alterna en directa. En la Fig. 2.1 “STADIUM Migración de iones” se muestran detalles de las celdas acopladas con el espécimen en el centro.



**Fig. 2.3.3. STADIUM migración de iones tomada de SIMCO Technologies Inc.**

**2011**

*Procedimiento desarrollado:*

Extracción de especímenes

Los especímenes fueron extraídos por el taladrado con broca a elementos prefabricados de hormigón ubicados en los sitios de exposición.

Preparación de los especímenes.

- Se realizó el corte de los especímenes por cada testigo
- Se introdujo los especímenes en solución de NaOH a 0.3M para su saturación por 3 días.

## *Capítulo II*

- Se extrajeron los especímenes para rebajarlos y pulir sus caras hasta los 27mm necesarios para el protocolo.
- Se introdujo en solución de NaOH a 0.3M por 7 días.
- Se sacaron los especímenes y fueron colocados en saturación al vacío por tres días

Procedimiento experimental desarrollado.

1. Secado de las superficies de los especímenes saturados con una tela de algodón limpia o un tejido fino y suave.
2. Medición de la geometría de cada espécimen. El diámetro y el espesor deben ser medidos con una precisión de 0.1 mm. Cada parámetro se determinó por el promedio de las tres medidas del espesor y dos medidas del diámetro (como mínimo). También se pesó el espécimen con la superficie seca con una precisión de 0.1 g.
3. Montado y sellado de cada espécimen encima de los dos anillos de conexión, usando la silicona, y fue completada la capa de todas las superficies laterales con silicona (2–3 mm de espesor).
4. Colocación de los especímenes en un área bien ventilada y se cubrió las superficies expuestas con papel mojado por alrededor de 2 horas, hasta que la silicona estuviese lo suficientemente seca y fuerte como para manipularla.
5. Se removió cualquier cantidad de silicona excedente de la superficie interior del espécimen a lo largo de los bordes del anillo, para obtener una máxima superficie de exposición. Se tomó en cuenta minimizar la contaminación de las superficies expuestas por la silicona.
6. Medición de los diámetros de las áreas efectivas de los especímenes, usando dos mediciones en posiciones diferentes de forma radial (dos mediciones a cada celda). Estos diámetros deben ser aproximadamente iguales, pero no más grandes que el diámetro de la boca del anillo.

## *Capítulo II*

7. Montaje del espécimen con los dos anillos encima de las dos celdas. Se evitó la fuga de la solución, aplicando grasa de vacío donde el anillo ensamblado está en contacto con las celdas. Se garantizó que los pernos estén bien apretados manteniendo unidas las dos celdas. Se llenaron las celdas con agua para comprobar que no haya fugas. Después de este paso de control, se vació el agua de las celdas y se quitó el agua excedente con un tejido fino y suave.

8. Relleno de la primera celda con la solución de NaOH, con una concentración de 0.3 moles.

9. Relleno de la otra celda con una mezcla de la solución de NaCl a una concentración de 0.5 moles, con una solución de NaOH a una concentración de 0.3 moles.

10. Cuando el sistema estuvo colocado y conectado a todos los electrodos de las celdas se conectó el sistema a la fuente de electricidad.

11. Encendido de la fuente de electricidad. Ajustar la salida de potencial para obtener una diferencia de potencial de 16–20 V a través de todos los especímenes. Registrar el potencial en los electrodos ( $V_e$ ) y la diferencia de potencial a través del espécimen ( $V_c$ )

12. Medición de la corriente que pasa a través de cada espécimen por más de 3 días.

13. Si la corriente está entre 5-100 mA entonces el nivel de potencial ha sido correctamente colocado. Registrar las lecturas iniciales de intensidad de corriente (para una precisión de 0.1 mA), y el potencial a través del espécimen (con una exactitud de 0.1 V). Registrar la fecha, la hora, la temperatura en °C y la humedad relativa en cada medición.

14. Durante el primer día de pruebas, se tomó las medidas de la intensidad de corriente ( $I$ ) que pasa a través de los especímenes y los potenciales ( $V_e$ : en el electrodo y  $V_c$ : la diferencia de potencial de cada espécimen), en la hora cero (comienzo de la prueba) y después cada 1 hora.

15. Después del primer día, las medidas del paso de corriente a través de cada espécimen y la diferencia potencial se hicieron cada 2, 4 y 12 horas respectivamente.

## Capítulo II

Una vez realizados todos los ensayos con los datos que se obtuvieron del paso de corriente a través de los especímenes, el programa es capaz de predecir el tiempo de vida de las estructuras de hormigón a través del ensayo de migración, mediante equipamiento desarrollado por STADIUM®-IDC.

### 2.4. Equipos, instrumentos y materiales empleados en los ensayos.

#### 2.4.1. Extracción de especímenes.

La extracción de los especímenes para el desarrollo de la presente investigación se realiza después de 9 meses en el caso de los hormigones producidos en el año 2017 y 17 meses en el caso de los hormigones producidos en el año 2016. Para la extracción de los mismos se utiliza:

- Taladro fijo con broca de 100 mm de diámetro.
- Pinza para sacar los especímenes.
- Agua para enfriar la broca en el proceso de taladrado
- Nylon retráctil, para envolver los especímenes, manteniendo las condiciones originales de exposición.



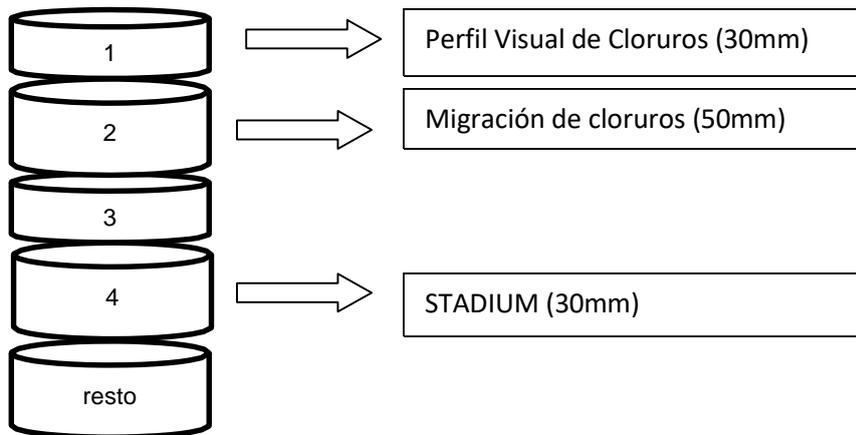
**Fig.2.4.extracción de especímenes.**



**Fig. 2.3. Retractilado de especímenes.**

#### 2.4.2 cortes de los especímenes.

El primer corte se realiza en una distancia de 30 mm de la cara expuesta al medio. Con esta muestra se realiza el ensayo del perfil visual de los cloruros. El segundo corte se realiza para obtener la muestra para el ensayo de migración de cloruros. Para el ensayo de STADIUM se utiliza la muestra obtenida del corte número 4. Las dimensiones de los cortes se presentan en la figura 2.4.2.



**Fig. 2.4.2. Cortes de especímenes.**

Para la realización de los cortes se utiliza:

- Sierra inglete para el corte, marca Maraga, con disco diamantado de corte de 2.4 mm de espesor y 180 mm de diámetro marca HUNTER.
- Pie de rey, para medir los espesores y diámetros con precisión de 0.1mm.
- Lápiz para marcar.

## *Capítulo II*

### **2.4.4 2.4.3 saturación y en la saturación al vacío de los especímenes**

1. Recipiente de vidrio para almacenar los especímenes en NaOH (saturación).
2. Recipiente de vidrio (hermético) con boquilla para la saturación al vacío de los especímenes en NaOH.
3. Bomba de vacío, conectada por una manguera a la boquilla del recipiente anterior

### **2.4.5 Migración de iones cloruros (ASTM C 1202).**

1. Celda de migración ensamblada.
2. Fuente para el suministro constante de voltaje, de potencia 0-30 V, intensidad de corriente 0-2 A.
3. Voltímetro digital: medición de potencial en el intervalo de 12-24 V, intervalo de intensidad de corriente de 0.1 mA, precisión en el orden de 0-200 mA y hasta 0.01 A, con precisión de 0.2-1 A.
4. Alambres conductores de electricidad que conecten la fuente de energía con los electrodos conectados a las celdas. La resistencia eléctrica de cada alambre debe ser de al menos de 0.01 ohm.
5. Pie de rey, para medir el espesor y el diámetro de los especímenes de hormigón, precisión de 0.02 mm.
6. Balanza, precisión: 0.01g.
7. Embudo y envases de cristal, resistentes al producto químico.

### **2.4.5. Resistividad superficial:**

El ensayo de la resistividad superficial se realiza con el equipo de Resipod.

## Capítulo II

### 2.4.6. Materiales y reactivos

1. Solución acuosa de NaCl, con una concentración de 0.5 moles, mezclado con NaOH, con una concentración de 0.3 moles.
2. Solución acuosa de NaOH con una concentración de 0.3 moles.
3. Sellantes: silicona epóxica para los especímenes y grasa especial para las celdas.
4. Agua destilada para la preparación de las soluciones

**Tabla 2.1. Composición química en g/litro de las soluciones.**

Sal/Base (pureza 99%)	Solución Celda (arriba) 0,5M(NaCl)+0,3M(NaOH)	Solución Celda(abajo) 0.3M(NaOH)
NaOH (g/litro)	12.121	12.121
NaCl (g/litro)	29.515	0

**Fuente: SIMCO Technologies Inc. 2011**

### 2.4.7 Medios de protección utilizados.

El empleo de diversos medios de protección resulta indispensable, tales como gafas protectoras, guantes de goma y protectores de las vías respiratorias para evitar inhalar gases tóxicos y polvos generado por el corte de los especímenes.

### Conclusiones Parciales:

- Los tres sitios de exposición permiten evaluar las propiedades de los diferentes hormigones ante la agresividad del medio ambiente y comparando mediante resultados anteriores el impacto del tiempo que llevan expuestos
- Se realiza los ensayos de la resistividad eléctrica, perfil visual de cloruro (nitrato de plata), migración de iones cloruros y STADIUM correctamente y siguiendo un orden adecuado para no alterar ningún resultado.
- Se respetan las instrucciones y normas, tanto cubanas como internacionales para los ensayos, con las cuales se sigue por pasos cada ensayo realizado.

**Cap. III. Análisis de los resultados obtenidos.**

En este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos de los ensayos realizados a los testigos extraídos de los bloques de hormigón colocados en los diferentes sitios de exposición. Es necesario recordar que en este trabajo se refiere al hormigón elaborado con la fracción de 5-9 mm encapsulado como ARE, al hormigón elaborado con áridos reciclados sin encapsulamiento AR y al hormigón elaborado con árido natural como AN.

**3.1. Diseño del plan experimental.**

En los años 2016 y 2017 se realiza hormigón con 100% de árido reciclado y 100% de árido reciclado encapsulado y 100% de árido natural. El diseño que se obtiene con las características de los áridos reciclados del 2017 se logró un contenido de fino muy bajo en el hormigón, donde no tiene una consistencia adecuada y se observa que los granos gruesos se separan de la muestra y ocurre todo lo contrario con la mezcla utilizada en el año 2016, por lo que se decide usar la misma dosificación con en 2016.

Arido 2016	[kg/m <sup>3</sup> ]		Arido 2017	[kg/m <sup>3</sup> ]
0-5	628	→	0-5	488
5-9	425		5-9	335
9-19	402		9-19	554
cemento	384		cemento	396
agua	173		agua	178

Diferencia de fino de 140kg/m<sup>3</sup> de Hormigón.

Llevando a cabo la encapsulación del material 5-9 mm para aumentar las propiedades del hormigón a producir se elaboran las muestras necesarias para realizar los ensayos de resistencia a compresión a los 7 y 28 días utilizando moldes cúbicos de 100mm x 100mm x 100mm y para los ensayo de la durabilidad utilizando moldes cilíndricos de 320 mm x 220 mm.

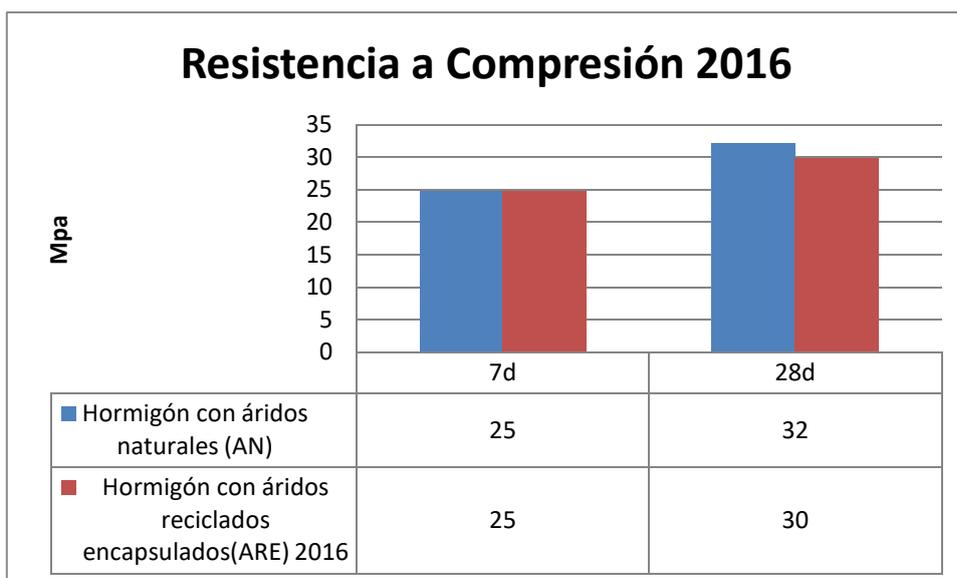
### Capítulo III

#### 3.2. Determinación de la resistencia de los especímenes.

Luego de realizadas las probetas de hormigón se realiza las resistencia a compresión de las mismas a los 7 y 28 días del año 2016 y 2017. Los resultados se presenta en las tablas 3.2 y 3.2.1

	7d (promedio)	28d(promedio)
Hormigón con árido natural(AN)	25	32
Hormigón con árido reciclado encapsulado(ARE)	25	30

**Tabla 3.2. Resistencia a compresión de Hormigones con áridos naturales 2016.**



**Gráfica 3.2. Resistencia a compresión de Hormigón con áridos naturales 2016.**

Resistencia a compresión 2017. Hormigón con árido reciclado sin encapsular.(AR) expuestos en la Sede Cayo Santa María y Punta Matamoros

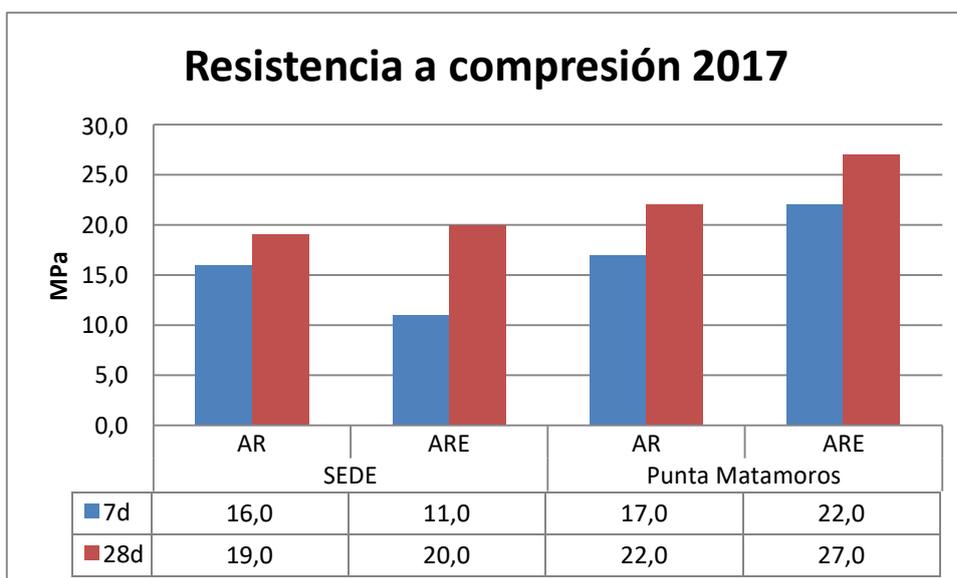
### Capítulo III

	7d (promedio)	28d (promedio)
Sede Cayo Santa María	16	19
Punta Matamoros	17	22

**Tabla 3.2.1. Resistencia a compresión 2017 de Hormigones con áridos reciclados.**  
Hormigones con áridos reciclados encapsulados (ARE) 2017.

	7d	Promedio	28d	Promedio
Sede Cayo Santa María	7.8	11	18.4	20
	8.7		18.4	
	17.5		22.3	
Punta Matamoros	19.4	22	28.1	27
	23.3		23.3	
	23.3		29.1	

**Tabla 3.2.2. Resistencia a compresión 2017 de Hormigones con áridos reciclados encapsulados.**



**Gráfica 3.2.2. Resistencia a compresión 2017.**

De las tablas anteriores se concluye contiene mayor resistencia el hormigón realizado con 100% árido reciclado encapsulado expuesto al mar realizada la encapsulación con cemento PZ-60 Kg/m<sup>3</sup> producto a que tiene menor relación a/c que resulta favorable ya

### Capítulo III

que hay menor número de poros en la mezcla que conforma la capa que cubre la fracción intermedia del árido.

#### 3.3. Determinación de la resistividad superficial.

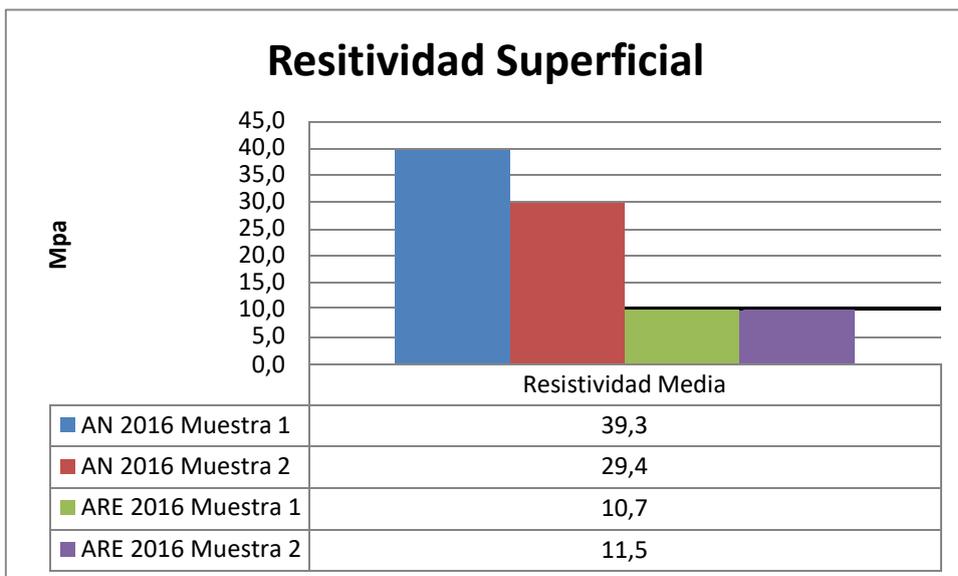
Para la realización del ensayo se colocó la muestra 48 horas las muestras en una solución de cal y agua con un pH de 12,5, como se especificó anteriormente. A partir de cada medición se chequeó la temperatura teniendo en cuenta que la temperatura de referencia es de 20°C.

Se obtuvo como resultados de 2018 los que aparecen en la siguiente tabla con una temperatura ambiente de 25.5°C en la Sede Cayo Santa María. Donde después de realizadas las mediciones hubo que corregirlas mediante la fórmula:

$$va_{corregida} = va_{medida} [1 - 0,03 \times (t - 20^{\circ}C)]$$

Elemento	Corrección (kΩ)	Resistividad Media	Promedio	Riesgo de corrosión	Velocidad de corrosión.
100% AN	39.6	39.3			
Elemento	Corrección (kΩ)	Resistividad Media	Promedio	Riesgo de corrosión	Velocidad de corrosión.
Muestra 1	37.5	10.7	34.3	Moderado	Baja
2016	36.9				
100% ARE	11.3	29.4	11.1	Moderado	Moderado
Muestra 1	10.8				
100% AN	28.9	11.5			
2016	10.2				
Muestra 2	29.8				
2016	10.8				
100% ARE	11.0				
Muestra 2	29.9				
2016	11.5				
	12.3				
	11.3				

Tabla 3.3. Resultados de Resistividad Superficial Sede Cayo Santa María.



**Gráfica 3.3. Gráfica de Resistividad superficial 2016.**

A continuación se presentan los resultados obtenidos para áridos reciclados encapsulados y áridos reciclados sin encapsulación expuestos en la Sede Cayo Santa María a los que por tener una temperatura de 25°C.

Elemento	Corrección (kΩ)	Resistividad Media	Promedio	Riesgo de corrosión	Velocidad de corrosión.
100% ARE 2017 Muestra 1	8.1	7.9	7.7	Alto	Alta
	7.8				
	7.7				
	8.1				
100% ARE 2017 Muestra 2	7.8	7.4	7.7	Alto	Alta
	7.3				
	7.2				
	7.4				

Capítulo III

Elemento	Corrección (kΩ)	Resistividad Media	Promedio	Riesgo de corrosión	Velocidad de corrosión.
100% AR 2017 Muestra 1	7.5	7.5	7.2	Alto	Alta
	7.8				
	7.5				
	7.3				
100% AR 2017 Muestra 2	6.5	6.8			
	6.5				
	7.2				
	6.9				

Tabla 3.2.1. Resultados de Resistividad Sede Cayo Santa María.



Gráfica 3.2.1. Resultados de Resistividad Superficial.

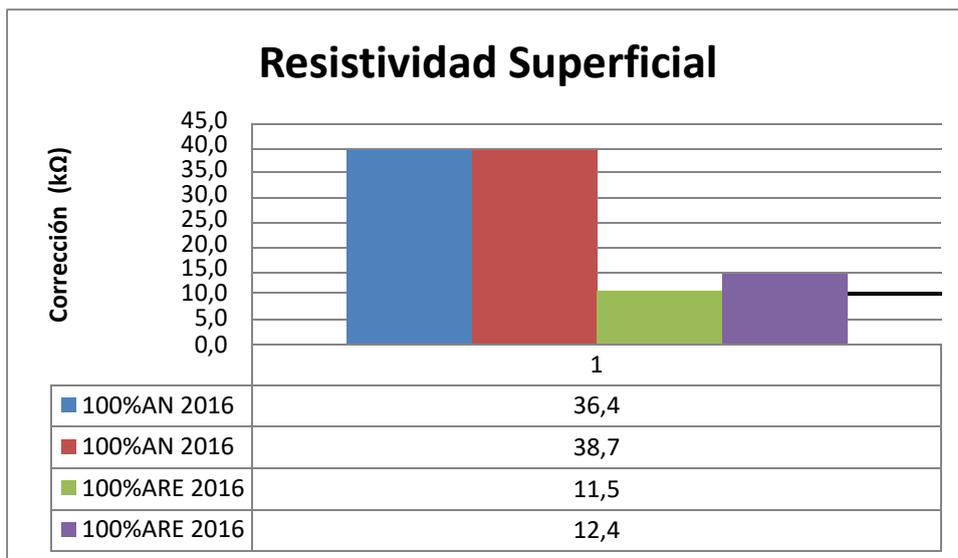
El resultado obtenido a las muestras de Punta Matamoros se realizó con una temperatura ambiente de 23.7 °C.

Tabla 3.3.2. Resultados de Resistividad Superficial Punta Matamoros

Capítulo III

Elemento	Corrección (kΩ)	Resistividad Media	Riesgo de corrosión	Velocidad de corrosión.
100% AN 2016 Muestra 1	36.8	36.4	Moderado	Baja
	35.6			
	37.1			
	36.3			
100% AN 2016Muestra 2	37.4	38.7	Moderado	Baja
	40.8			
	39.0			
	37.3			

Elemento	Corrección (kΩ)	Resistividad Media	Riesgo de corrosión	Velocidad de corrosión.
100% ARE 2016 Muestra 1	12.1	11.5	Moderado	Baja
	11.7			
	10.9			
	11.4			
100% ARE 2016 Muestra 2	12.7	12.5	Moderado	Baja
	12.1			
	12.2			
	12.5			

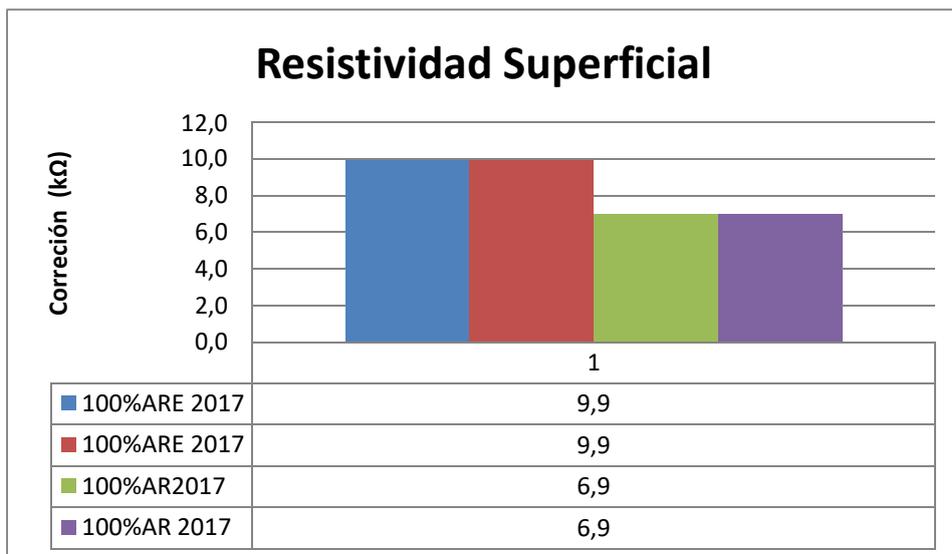


Gráfica 3.3.2. Resultados de Resistividad Superficial Punta Matamoros.

Capítulo III

Elemento	Corrección (kΩ)	Resistividad Media	Riesgo de corrosión	Velocidad de corrosión.
100% ARE 2017 Muestra 1	10.1	9.9	Alto	Alta
	9.9			
	9.8			
	9.7			
100%ARE 2017Muestra 2	9.9	9.9	Alto	Alto
	9.9			
	9.8			
	9.7			
Elemento	Corrección (kΩ)	Resistividad Media	Riesgo de corrosión	Velocidad de corrosión.
100% AR 2017 Muestra 1	10.1	9.9	Alto	Alta
	9.9			
	9.8			
	9.7			
100%AR 2017Muestra 2	9.9	9.9	Alto	Alto
	9.9			
	9.8			
	9.7			

Tabla 3.3.3. Resultados de Resistividad Superficial Punta Matamoros.



Gráfica 3.3.3. Resultados de Resistividad Superficial Punta Matamoros.

### Capítulo III

El ensayo realizado a las muestras en el año 2017 se muestras expuestas en la Sede Cayo Santa María. Debido a problemas presentados a la hora de preparar las mezclas de hormigón y extraer los especímenes solo se obtuvo el valor para una muestra de hormigón con árido natural a una temperatura ambiente de 23.5°C por lo que se aplicó la fórmula de corrección de la resistividad teniendo como resultados los expuestos en la siguiente tabla.

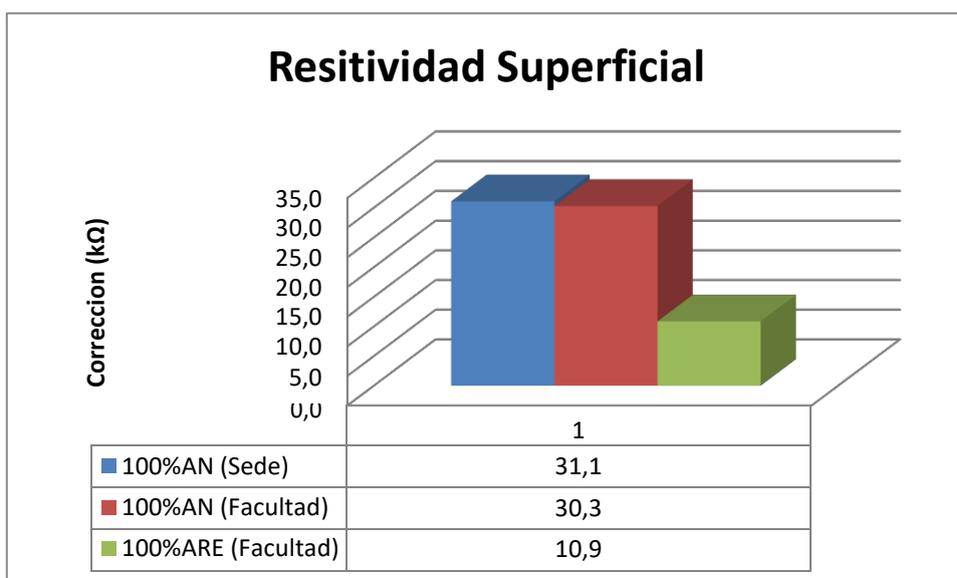
Elemento	Corrección (kΩ)	Resistividad Media	Riesgo de corrosión	Velocidad de corrosión.
100% AN	31.7	31.1	Moderado	Baja
	32.5			
	30.2			
	29.8			

**Tabla 3.34. Resultados de Resistividad Superficial Punta Matamoros.**

Las muestras expuestas en la Facultad de construcciones estuvieron expuestas a una temperatura ambiente de 24.1°C.

Elemento	Corrección (kΩ)	Resistividad Media	Riesgo de corrosión	Velocidad de corrosión.
100% AN	28.7	30.3	Moderado	Baja
	31.0			
	30.7			
	30.7			
100%ARE	11.4	11.2	Moderado	Moderado
	11.6			
	10.9			
	10.9			

**Tabla 3.3.5. Resultados de Resistividad Superficial Facultad de Construcciones.**



**Gráfica 3.3.5. Resultados de Resistividad Superficial.**

### 3.4. Perfil visual de cloruro.

Para la determinación de este ensayo se cortó la probeta 30mm de la cara expuesta al medio y luego se le hizo otro corte (seco) a la probeta a la mitad aplicándole a la misma la solución de nitrato de plata y obteniendo los siguientes resultados. A pesar de no ser un ensayo con valores muy exactos da un pronóstico de lo que pudiera suceder ante el impacto de iones cloruros. En las siguientes tablas se demuestran los valores obtenidos.

Elemento	Mediciones(mm)				Promedio
AN <sub>1</sub> 1 (2016)	2	3	3	3	2.75
AN <sub>1</sub> 2 (2016)	1	0.5	1	0	0.625
AN <sub>2</sub> 1 (2016)	3	2	3	2	2.5
AN <sub>2</sub> 2 (2016)	2	3	2	2	2.25
AN FAC 1 (2016)	1	1	2	2	1.5
ANFAC 2 (2016)	2	3	2	2	2.25
ARE <sub>1</sub> 1 (2016)	0	0	0	0	0
ARE <sub>1</sub> 2 (2016)	2.6	1.9	1.4	1.3	7.2
ARE <sub>2</sub> 1 (2016)	4	2	1	1	1.75
ARE <sub>2</sub> 2 (2016)	2	2	1	0	1.25
ARE FAC 2 (2016)	0	0	0	0	0
ARE FAC 1 (2016)	2	1	5	4	3

**Tabla 3.4. Resultados de perfil visual de cloruros (hormigones de 2016)**

### Capítulo III

Elemento	Mediciones(mm)				Promedio
AR <sub>1</sub> (2017) 1	0	1	2	1	1.33
AR <sub>1</sub> (2017) 2	2	3	1	3	2.25
AR <sub>2</sub> (2017) 1	4	1	7	5	4.25
AR <sub>2</sub> (2017) 2	4	6	4	7	5.25
AR FAC (2017)1	9	2	1	1	3.25
AR FAC (2017)1	7	1.5	0.5	0.5	2.375
ARE <sub>1</sub> (2017) 1	5	0	0	4	2.25
ARE <sub>1</sub> (2017) 2	1	1	0.5	0	0.625
ARE <sub>2</sub> (2017) 1	2	3	1	0	1.5
ARE <sub>2</sub> (2017) 2	0	3	4	4	2.25
ARE FAC(2017)1	0	1.2	1.1	9	2.825
ARE FAC(2017) 2	4	2	1	2	2.25

**Tabla 3.5. Resultados de perfil visual de cloruros (hormigones de 2017)**

Aunque el hormigón con áridos reciclados sin encapsulación producido en 2017 y así expuesto solo 9 meses en comparación con los hormigones en 2016, el avance de los cloruros es mayor. Esto es debido a la mayor porosidad de los áridos reciclados. Con el encapsulamiento de la fracción de 5-9 mm se puede disminuir la penetración de cloruros hasta un 27.7%.

En los gráficos 3.4.2 a gráfico 3.4.4 se presenta los resultados, los cuales muestran que los áridos reciclados encapsulados alcanzan valores parecidos o menores en comparación a los hormigones con áridos naturales, lo cual es favorable en los distintos sitios de exposición.



**Fig. 3.4. Ensayo de perfil visual de cloruro.(ARE 2016 Punta Matamoros).**



Fig. 3.4.1. Ensayo de perfil visual de cloruro.(ARE 2016 Sede Cayo Santa María).



Fig. 3.4.2. Ensayo de perfil visual de cloruro.(ARE 2016 Facultad de Construcciones).

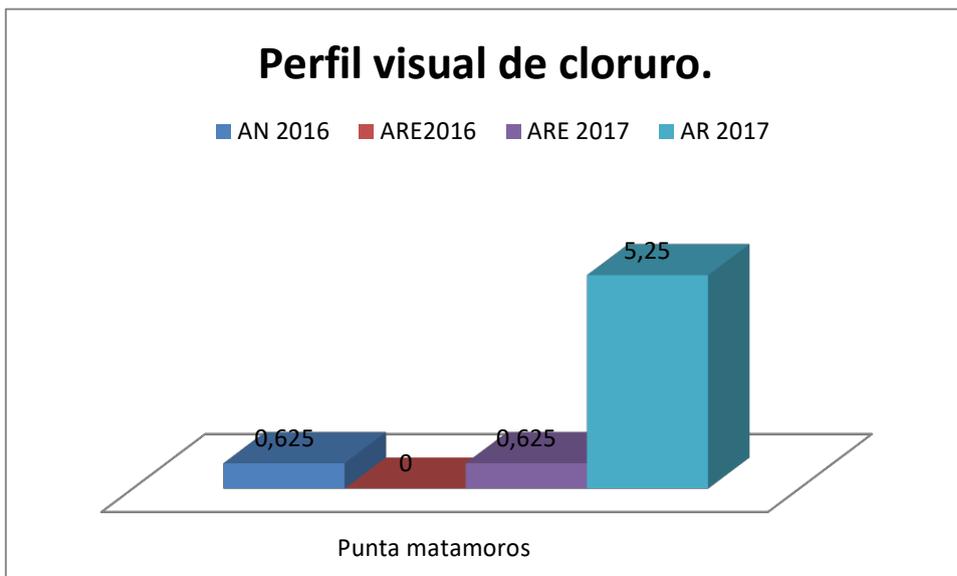
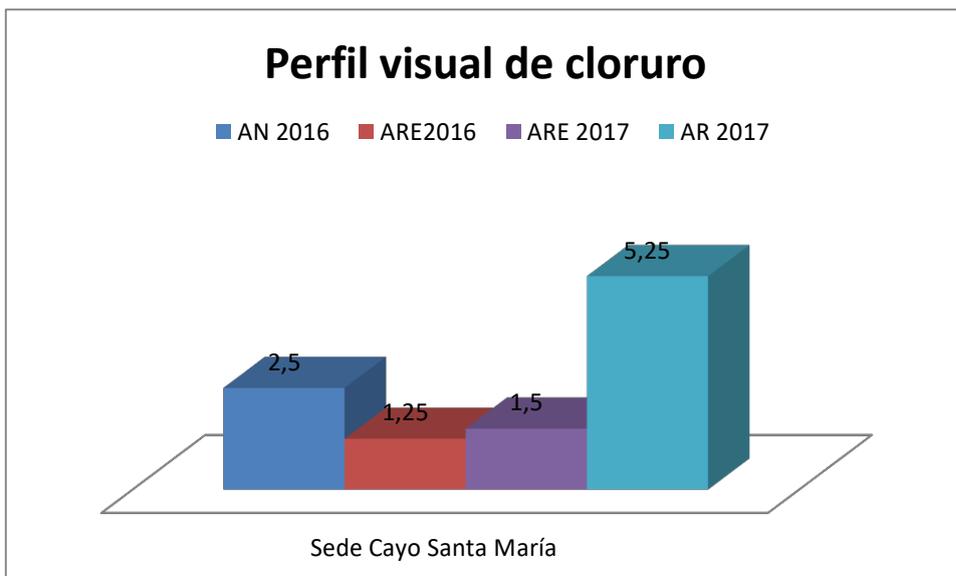


Gráfico 3.4.2. Ensayo de Perfil Visual de cloruro. Punta Matamoros.

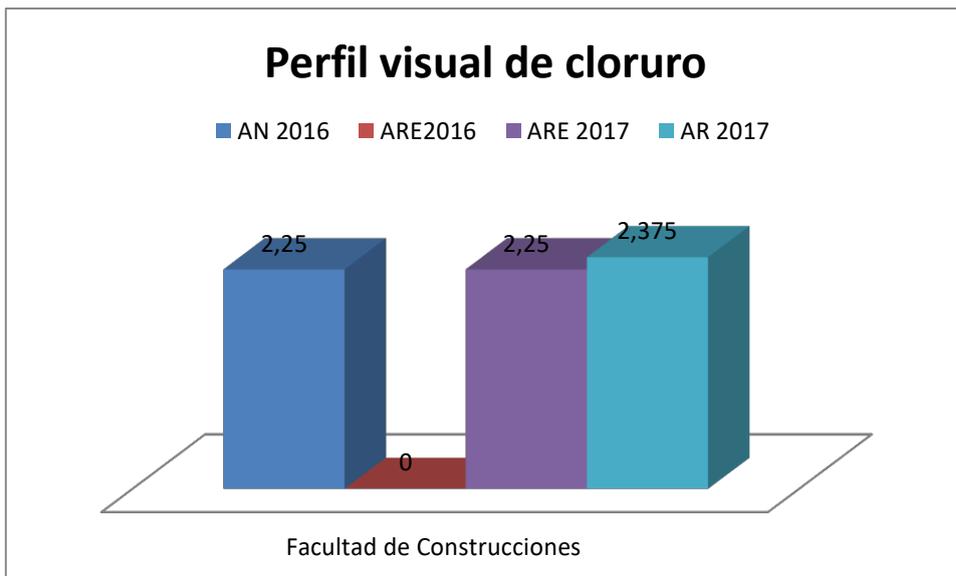
### Capítulo III

Se observa cómo se logra en el 2016 que los hormigones con árido reciclado encapsulado disminuya un 62.5% el paso de iones con respecto al árido natural y en el año 2017 alcance el mismo valor del árido natural y que los hormigones con áridos reciclados sin encapsular aumenten en 11.9% con respecto al árido natural en un sitio de exposición con una agresividad muy alta ya que estos tienen una mayor porosidad y un mayor número de poros intercomunicados debido al mortero adherido a él. Estos resultados son favorables ya que prueban las ventajas de la encapsulación en los áridos reciclados.



**Gráfico 3.4.3. Ensayo de Perfil Visual de cloruro. Sede Cayo Santa María.**

En el gráfico 3.4.3 se observa como los hormigones con árido reciclado encapsulado producidos en el año 2016 disminuyen un 50% el paso de iones con respecto al árido natural, en el hormigón con árido reciclado del año 2017 disminuyen 60% y los hormigones con árido reciclado sin encapsular aumenten un 47.65% con respecto al árido natural.



**Gráfico 3.4.4. Ensayo de Perfil Visual de cloruro. Facultad de Construcciones.**

Los resultados que presenta gráfico 3.4.4 muestra que los hormigones con árido reciclado encapsulado del año 2016 disminuyen en un 40% con respecto al árido natural, los hormigones con árido reciclado encapsulado del año 2017 mantiene su comportamiento igual a los con árido natural y el árido reciclado sin encapsulación aumenta en un 94.7%.

### **3.5. Resultados de migración de cloruros.**

Durante la realización del ensayo hubo un fallo en la electricidad por lo que las muestras de AR 2017 1 de la sede, ARE 2017 1 de la facultad y AR 2017 1 de Punta Matamoros fueron puestas nuevamente por lo que los resultados sufrieron cambios. Además, las muestras que fueron detenidas durante la realización del ensayo es debido a la alta porosidad que presenta el árido.

Capítulo III

	Punta Matamoros							
	AN		ARE 2016		ARE 2017		AR	
	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2
Voltaje(V)	60	60	60	60	60	60	60	60
Corriente (mA)	85.2	500.0	294.0	500.3	400.5	446.5	500.5	500.5
Promedio Corriente	292.6		397.2		423.5		500.5	
Temperatura(°c)	31.3	33.2	37.8	57	27.6	N.A	35	37.8
Tiempo(h)	6:00	2:43	6:00	1:23	6:00	6:00	0:58	0:45
Coulomb	1443	2453	5707	8342	6975	7973	9461	9547
Tipo de Permeabilidad	Moderado		Alto		Alto		Alto	

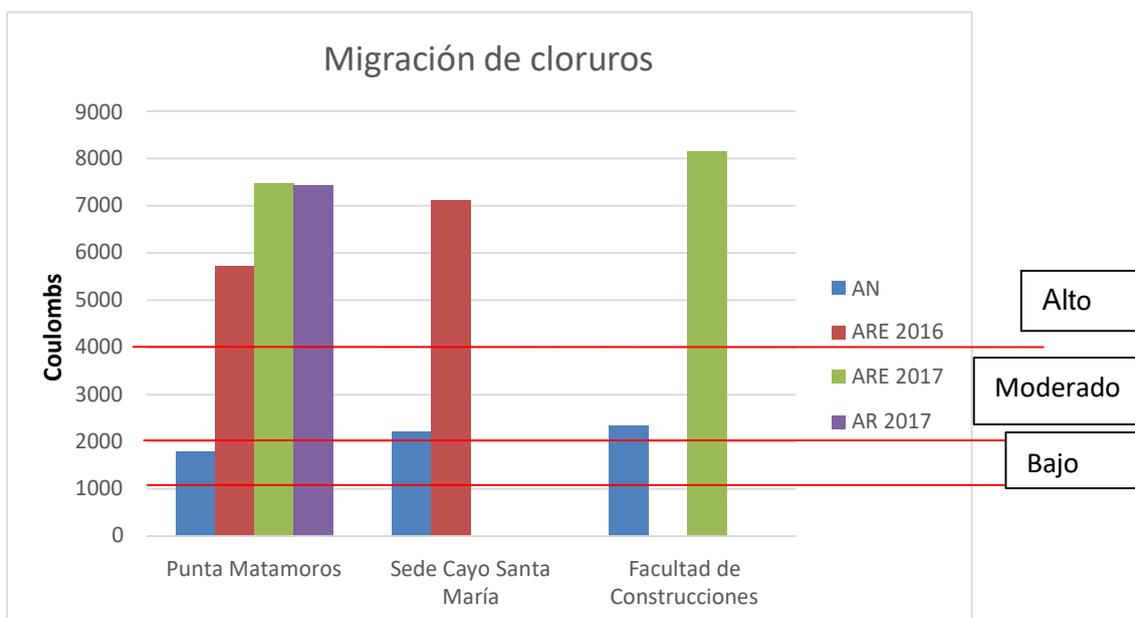
Capítulo III

	Sede Cayo Santa María							
	AN		ARE 2016		ARE 2017		AR 2017	
	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2
Voltaje(V)	60	60	60	60	60	60	60	60
Corriente (mA)	378.9	106.8	500.6	466.1	459	346	456.5	454.6
Promedio Corriente	242.9		483.4		402.5		455.6	
Temperatura(°c)	45	35.8	60.3	64.3	N.A	N.A	NA	39.1
Tiempo(h)	6:00	6:00	4:03	6:00	6:00	6:00	6:00	6:00
Coulomb	2600	1835	8530	7109	8453	7826	7973	6869
Tipo de Permeabilidad	Moderado		Alto		Alto		Alto	

Capítulo III

	Facultad de Construcciones							
	AN		ARE 2016		ARE 2017		AR	
	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2
Voltaje(V)	60	60	60	60	60	60	60	60
Corriente (mA)	137	124.7	503.5	500.5	127.0	76.0	501.8	500.8
Promedio Corriente	130.9		502.0		101.5		501.3	
Temperatura(°c)	70	40.1	50.8	35	33.2	60.8	39.73	34.6
Tiempo(h)	6:00	6:00	1:56	0:58	6:00	6:00	2:36	0:42
Coulomb	2453	2200	9182	9461	8453	8150	9178	9592
Tipo de Permeabilidad	Moderado		Alto		Alto		Alto	

**Tablas 3.5. Resultados del ensayo de migración de cloruros ASTM (C 1202).**



**Gráfica 3.5. Resultados del ensayo de migración de cloruros ASTM (C 1202).**

Al realizar un análisis de los resultados obtenidos se aprecia como el árido reciclado encapsulado y sin encapsular tiene valores altos en los diferentes ambientes de agresividad por lo mismo se puede decir que teniendo en cuenta la tabla 2.3.2. Esto ocurre ya que la relación a/c es superior a 0,6 donde los valores de AR superan a los de AN por la porosidad del hormigón adherido a él, lo cual facilita la transportación de cloruros mediante poros conectados.

Los hormigones de AN están en el rango de bajo en Punta matamoros y moderado en SEDE y UCLV. Sin embargo la diferencia entre ellos es despreciable.

En el hormigón con ARE 2016 se logra una mejora a causa del encapsulamiento de 28% y el ARE 2017 disminuye en un 26% en comparación al hormigón con AR, en Punta Matamoros.

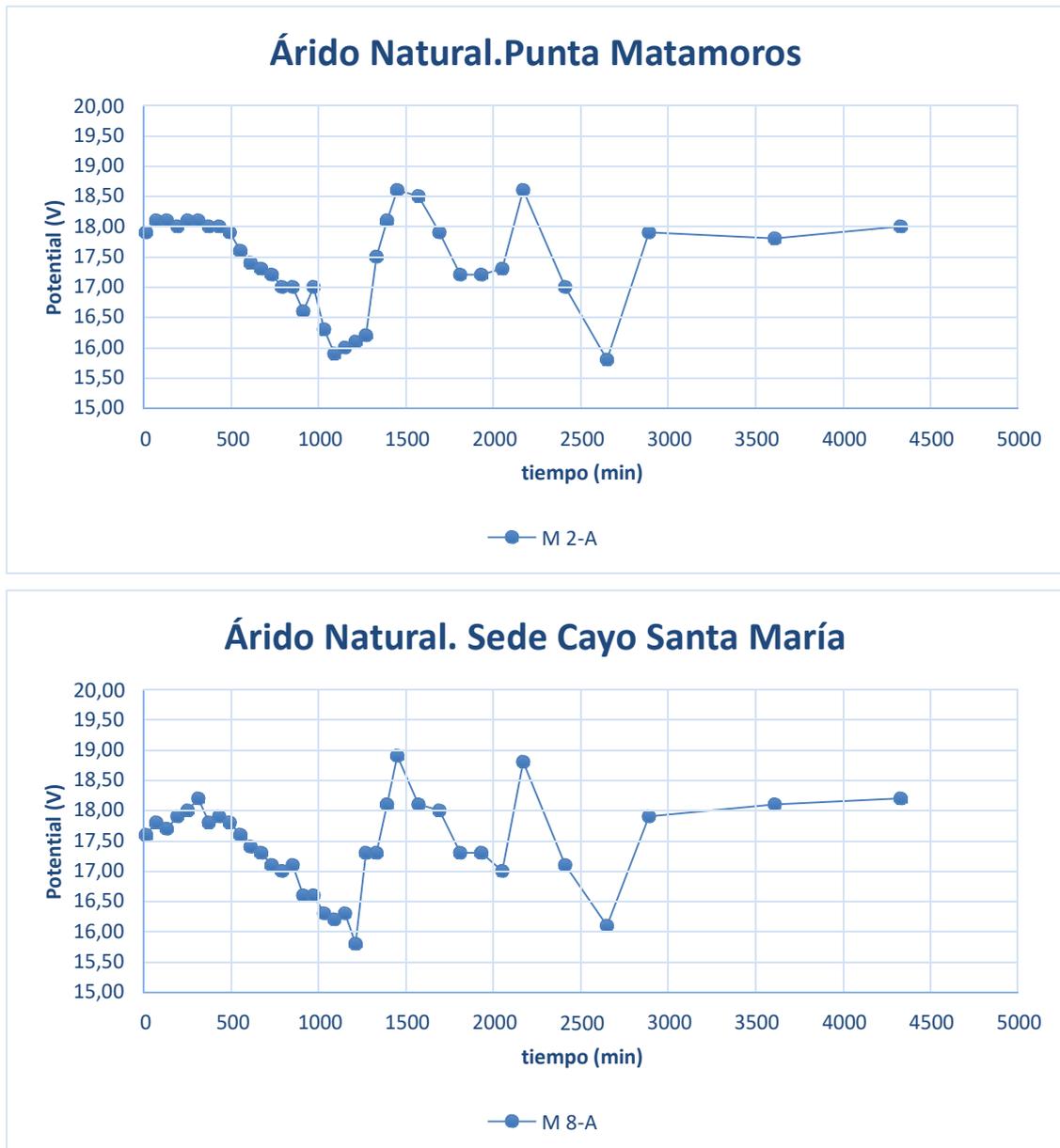
En los sitios de la Sede y la Facultad no se puede notar una diferencia entre los tres hormigones con áridos reciclados. Se debe tener en cuenta que la precisión al realizar el ensayo por el operador puede variar en un 12,4%, por consiguiente los resultados de dos pruebas propiamente dirigidas por el mismo operador en las muestras de hormigón del mismo lote y del mismo diámetro no debe diferir por más de 42% (ASTM, 2015)

Refiriéndose a los resultados de Punta Matamoros, los cuales a su vez también corresponden con los resultados del perfil visual de cloruros, se puede pensar que en los casos de la SEDE y UCLV la precisión del ensayo influye y da valores superiores.

### 3.6. Resultados de STADIUM.

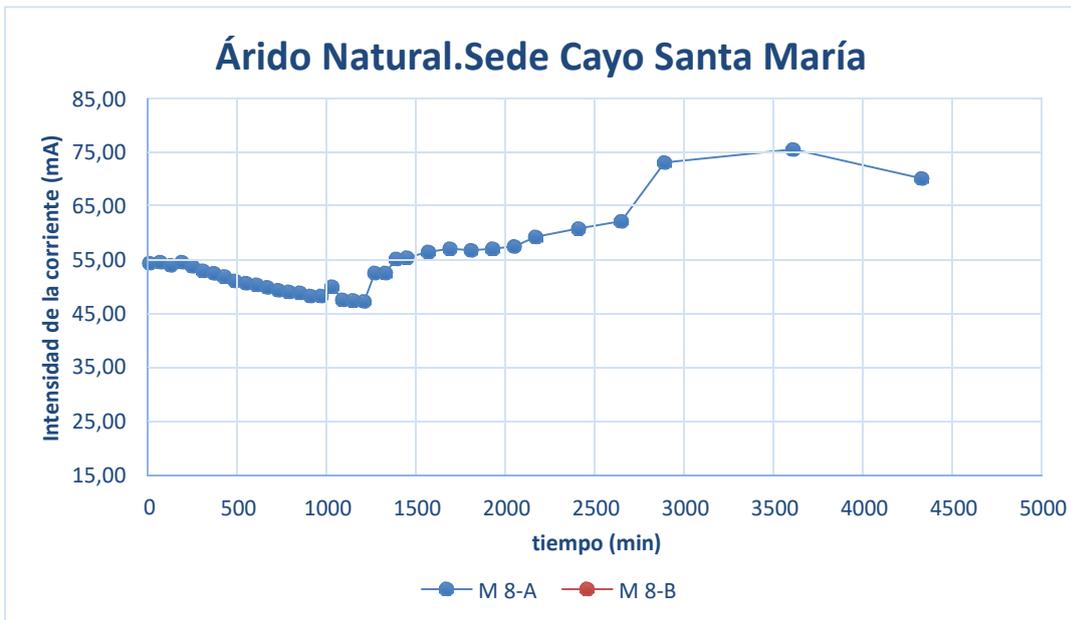
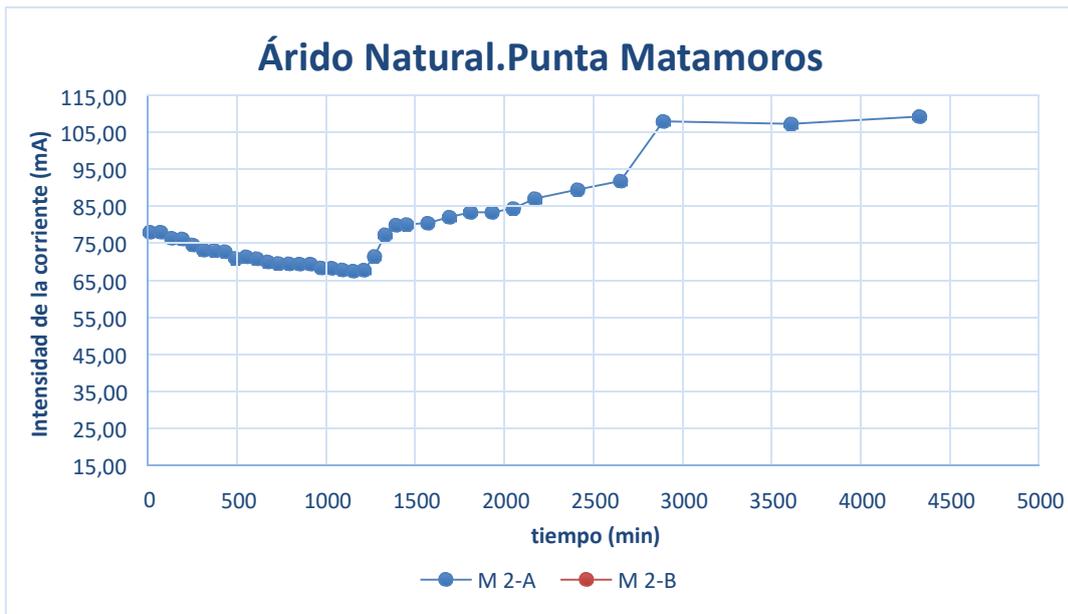
A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de diferencia de potencial ( $V_c$  en Volts) e intensidad de la corriente ( $I$  en mili-Amperes) en el tiempo, para los especímenes de áridos naturales de Punta Matamoros y Sede Cayo Santa María.

La Figura 3.6 muestra la trayectoria de la diferencia de potencial en función del tiempo. Donde la diferencia de potencial oscila entre 15.9 V y 18.6 V.



**Fig.3.6. Diferencia de potencial (V) vs tiempo (min)**

La Fig. 3.7. representa el comportamiento de la intensidad de la corriente en función del tiempo en el espécimen de árido natural alcanzando un mínimo de 64.6mA de iniciado el ensayo y un valor máximo de 109.8 mA.



**Fig.3.7. Diferencia de intensidad (mA) vs tiempo (min)**

Los resultados obtenidos en la aplicación del protocolo STADIUM muestran distintos valores en los dos sitios. Los valores de la intensidad son mayor para la muestra expuesta en el sitio Punta Matamoros mientras el potencial en ambas muestras es parecido.

Ante el hecho de que los hormigones en los dos sitios tienen la misma dosificación, pero estuvieron producidos en dos días distintos, se puede suponer que en la producción de los especímenes de los hormigones expuesto al sitio de Punta Matamoros no se compactó bien el hormigón o que se ha influido la relación agua/cemento por alguna razón. Estos dos errores pueden afectar la porosidad del hormigón.

### *Capítulo III*

Sin embargo, los valores obtenidos en general son mejor que se esperaba por investigaciones anteriores con diferentes hormigones utilizando áridos naturales, donde los valores iniciales ya son mayor a los finales obtenidos en el presente estudio.

#### **Conclusiones Parciales.**

- Los hormigones elaborados con áridos naturales tienen un mejor comportamiento en todos los sitios de exposición con respecto a los hormigones con áridos reciclados.
- Según el ensayo de resistividad superficial el árido reciclado presentó una alta probabilidad de corrosión lo que es recomendable utilizarlo en hormigones no armados para evitar así la corrosión de las armaduras.
- Según el ensayo de migración de cloruros es recomendable utilizar árido reciclado en construcciones donde no se exponga a altos niveles de agresividad, ya que se puede corroerse fácilmente.
- Obtenido los resultados de nitrato de plata se obtuvieron valores pequeños de la penetración real de los cloruros pero siendo superiores a los de áridos naturales por lo que no se debe utilizar los áridos reciclados donde las estructuras puedan corroerse.

## *CONCLUSIONES GENERALES*

### **CONCLUSIONES GENERALES.**

- Se llevaron a cabo los ensayos de durabilidad a todas las muestras de hormigón con áridos naturales y áridos reciclados siguiendo las normas y con un orden establecido.
- Después de analizados los resultados de la resistividad eléctrica se determina ser coherentes los mismos ya que los áridos reciclados presentan una alta probabilidad de corrosión mientras que los áridos naturales se comportan moderados.
- Es recomendable el uso de áridos reciclados para estructuras de hormigón no armado ya que pueden corroerse en cualquier sitio de agresividad según los ensayos de resistividad eléctrica, migración de cloruros y nitrato de plata.
- A pesar de que los resultados en los hormigones con áridos reciclados hayan dado altos y no se comportan como los hormigones con áridos naturales ya que dan mucho mayores que estos siguen siendo una alternativa viable para la sustitución del árido natural ambientes de baja agresividad.

## *RECOMENDACIONES*

### **Recomendaciones**

- Continuar los estudios de durabilidad en hormigones elaborados con áridos reciclados encapsulados en un período de tiempo mayor para lograr exactitud en los resultados.
- Realizar una Norma Cubana donde se incluya el uso de áridos reciclado, incluyendo las diferentes especificaciones para alcanzar un hormigón con la calidad requerida.
- Mantener un especial cuidado en el almacenamiento de estos áridos donde se evite el contacto con el medio ambiente ya que puede afectar las propiedades de estos, ya que absorben gran humedad y esto puede provocar resultados no deseados en las propiedades del hormigón.

**Bibliografía**

Alaejos. (2008). Tipos y propiedades de áridos reciclados. Catálogo de residuos utilizables en construcción.

Andrade, C. (1993). Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from.

Andrade, C. (1993). Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic measurements. *Cement and Concrete Residues* 23: 724-74.

Andrade, C. (1993). Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurement. *Cement and Concrete Residues*.

Arenas, M. M. (2012). *Materiales sostenibles en la edificación* .

ASTM. (s.f.).

ASTM C 1202. (s.f.). *1997 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to resist Chloride Ion Penetration* .

ASTM. (2015). *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime* 1.

Barra, M., Aponte, D., H, S. P., Vallo, S., & Vazquez, E. (2011). Utilización de árido reciclado "Una oportunidad frente a la situación actual".

Benedicto, J. A. (2010). Estudio sobre propiedades mecánicas del hormigón reciclado con áridos reciclados en prefabricación. Influencia de la variación de las propiedades del árido reciclado en el hormigón endurecido.

Calderón, A. N. (2014). Uso y fomento del árido reciclado en hormigón estructural como oportunidad de mejora medio-ambiental y económica. Aplicación a la comunidad autónoma de la Roja.

Castaño, J. O. (2013). Gestión de residuos de construcción y demolición en Bogotá: perspectivas y limitantes.

Cereijo, C. S. (2010). Caracterización mecánica de hormigones con alto contenido de finos. Universidad Politécnica de Cataluña.

Collins, R. J. (1998). *Recycled aggregates*.

(2017). *Compañía Progotech Know-How*.

Covarrubias, F. G. (2017). *Revista Científica de Ingeniería y Desarrollo*. Vol. 35, No 1. *Propiedades en estado fresco de morteros con áridos reciclados de hormigón y efecto de la relación a/c* .

Delestrac, S. (2013). *Die neue Umweltzertifikate*.

## *Bibliografía*

- Fe, E. P. (2012). Empleo de árido reciclado de hormigón en la fabricación de hormigón estructural. Cujae.
- Fe, P. d. (2012). Empleo del árido reciclado de hormigón en la fabricación de hormigón estructural.
- Fernández, C. C. (2015). Fabricación de bloques huecos de hormigón con árido reciclado.
- Fernández, L. M. (2015). Revisión de la normativa para el empleo de áridos de hormigón reciclado en Cuba.
- Hernández, D. (2009). Estudio de las propiedades físico-mecánicas y la durabilidad del hormigón reciclado. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría: Ciudad de La Habana.
- Herrera, I. E. (2012). Evaluación de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados mixtos con diferentes procesos de obtención.
- Instrucción de hormigón estructural. EHE. (105/2008). *B.O.E// Real decreto* .
- Jorge Ramón Cruz García, Ramón Velázquez Yáñez. (2004). Concreto Reciclado.
- Juan, M. S. (2004). Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural.
- López, I. V. (2013). Utilización de hormigones con incorporación de áridos reciclados y fibras metálicas en pilotes y/o pantallas.
- Machado, J. A., & H. B. (1998). Perfiles de penetración de cloruro de estado iónico en concreto del rango a/c 0,45 a 0,65.
- Martínez, E. I. (2011). Propiedades del hormigón de árido reciclado fabricado con adiciones activos e inertes.
- Martirena, F. (2015). Improving quality of coarse recycled aggregate through cement coating.
- Merino, M. d. (2012). Características Mecánicas de hormigones con áridos reciclados procedentes de los rechazos en prefabricaciones.
- Merino, M. d. (2016). Problemática de Residuos de Construcción y Demolición. Propuesta para su gestión y reciclaje.
- Monzón, A. Y. (2013). Estudio de la fracción fina de áridos reciclados como áridos para la construcción: Universidad Central "Marta Abreu de las Villas".
- Moreno, A. d. (2001). El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado.
- Muñoz, J. M., & Agrela, F. S. (2012). Aplicaciones de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición en la construcción de infraestructuras viarias.
- NC 178-2002. (s.f.). *Análisis granulométrico* .

## *Bibliografía*

NC 186 . (s.f.). *Arenas. Peso Específico y Absorción de Agua* .

NC 187. (s.f.). *Árido grueso. Peso Específico y Abrasión de agua* .

NC 251 2013. (s.f.). *Áridos para Hormigón Hidráulico* .

Pérez Pérez. (2016). Fabricación de bloques de hormigón con árido reciclado para la colocación en sitio de exposición Cayo Santa María, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.

Pérez, M. I. (2013). Gestión y tratamiento de residuos de construcción y demolición .

Rainho, C. V. (2015). Estudio comparativo de los sistemas de gestión de Residuos de Construcción y Demolición entre España y Brasil.

Real, L. V. (2015). Creative Commons.

Resipod Sales Flyer. (s.f.). *ISO 9001* .

Robas, A. H. (2008). Influencia de lavariación de las propiedades del árido reciclado en el hormigón endurecido.

Ruíz, S. A. (2005). Utilización del hormigón reciclado como material de reemplazo de árido grueso para la fabricación de hormigones.

Sáez, P. V., & del Río Merino, M. (2012). Modelo empírico para el cálculo de los residuos generados en obras de edificación residencial.

Sark, J., & Wicht, B. (2013). *Dauerhaftigkeit von Beton*.

Soto, O. (2008). Catálogo de residuos de construcción .

Telmatzi, J. F. (2014). Gestión de residuos de construcción y demoición en Alemania .

UNE 146.120:97. (1997). *Áridos para hormigones. Especificaciones* .

Wietek, B. (1996). A corrosion Monitoring System for Stell Reinforced Concrete.

Wietek, B. E. (1996). Permanent Monitoring for Reinforced and Pressed Concrete Structures. Ed. CMS. GmbH-A-6073. Innsbruck-Sistrans 290. Australia.

**ANEXOS**

		7d		28d	
		promedio		promedio	
Hormigón con áridos reciclados encapsulados(ARE) 2017	SEDE Cayo	7.8	11.0	18.4	20.0
		8.7		18.4	
		17.5		22.3	
	Punta Matamoros	19.4	22.0	28.1	27.0
		23.3		23.3	
		23.3		29.1	
Valores de UCLV no existen					
<b>resistencia a compresión 2016</b>					
		<b>7d</b>	<b>28d</b>		
		promedio	promedio		
Hormigón con áridos naturales (AN)		25	32		
Hormigón con áridos reciclados encapsulados(ARE) 2016		25	30		
<b>resistencia a compresión 2017</b>					
		7d		28d	
		promedio		promedio	
Hormigón con áridos reciclados sin encapsulación(AR) 2017	SEDE Cayo	15.5	16.0	19.4	19.0
		16.5		15.5	
AR		16.5		21.3	
ARE	Punta Matamoros	16.5	17.0	20.4	22.0
AR		18.4		22.3	
ARE		14.6		24.3	
Valores de UCLV no existen					

# Anexos

2018

Sede Cayo Santa María						
Elemento	Resistividad (kΩ)	Temperatura	Corrección (kΩ)	Resistividad Media	Promedio	Desv. Estandar
100% NAC SEDE Cayo Santa María	33.1	25.5	39.6	39.3	34.3	2.761208506
	31.3	25.5	37.5			
	30.8	25.5	36.9			
	35.9	25.5	43.0			
100% NAC SEDE Cayo Santa María	24.1	25.5	28.9	29.4		0.529976768
	24.9	25.5	29.8			
	24.3	25.5	29.1			
	25	25.5	29.9			
100% RAC 2016 (enc. with 51kg/m³) SEDE 1	9.4	25.5	11.3	10.7	11.1	0.44138412
	9	25.5	10.8			
	8.5	25.5	10.2			
	9	25.5	10.8			
100% RAC 2016 (enc. with 51kg/m³) SEDE 2	9.2	25.5	11.0	11.5		0.573309645
	9.6	25.5	11.5			
	10.3	25.5	12.3			
	9.4	25.5	11.3			
100% RAC 2017 (enc. with 60kg/m³) SEDE	6.8	25.5	8.1	7.9	7.7	0.246892552
	6.5	25.5	7.8			
	6.4	25.5	7.7			
	6.8	25.5	8.1			

100% RAC 2017 (enc. with 60kg/m³) SEDE	6.8	25.5	8.1	7.9	7.7	0.246892552
	6.5	25.5	7.8			
	6.4	25.5	7.7			
	6.8	25.5	8.1			
100% RAC 2017 (enc. with 60kg/m³) SEDE 2	6.5	25.5	7.8	7.4		0.258712204
	6.1	25.5	7.3			
	6	25.5	7.2			
	6.2	25.5	7.4			
100% RAC 2017 SEDE	6.3	25.5	7.5	7.5	7.2	0.195568043
	6.5	25.5	7.8			
	6.3	25.5	7.5			
	6.1	25.5	7.3			
100% RAC 2017 SEDE	5.4	25.5	6.5	6.8		0.359281437
	5.4	25.5	6.5			
	6	25.5	7.2			
	5.8	25.5	6.9			

Punta Matamoros						
Elemento	Resistividad (kΩ)	Temperatura	Corrección (kΩ)	Resistividad Media	Desv. Estandar	
100% NAC P.Mat.	30.7	25.5	36.8	36.4	37.6	0.673042527
	29.7	25.5	35.6			
	31	25.5	37.1			
	30.3	25.5	36.3			
100% NAC P.Mat.	31.2	25.5	37.4	38.7		1.598925739
	34.1	25.5	40.8			
	32.6	25.5	39.0			
	31.4	25.5	37.6			
100% RAC 2016 (enc. with 51kg/m³) P.Mat.	10.1	25.5	12.1	11.5	11.9	0.511616991
	9.8	25.5	11.7			
	9.1	25.5	10.9			
	9.5	25.5	11.4			
100% RAC 2016 (enc. with 51kg/m³) P.Mat.	10.6	25.5	12.7	12.4		0.265551591
	10.1	25.5	12.1			
	10.2	25.5	12.2			
	10.4	25.5	12.5			

100% RAC 2017 (enc. with 60kg/m³) P.Mat.	8.4	25.5	10.1	9.9	9.9	0.154610114
	8.3	25.5	9.9			
	8.2	25.5	9.8			
	8.1	25.5	9.7			
100% RAC 2017 (enc. with 60kg/m³) P.Mat.	8.3	25.5	9.9	9.9		0.114661929
	8.3	25.5	9.9			
	8.2	25.5	9.8			
	8.1	25.5	9.7			
100% RAC 2017 P.Mat.	5.6	25.5	6.7	6.9	6.9	0.204529955
	5.8	25.5	6.9			
	5.7	25.5	6.8			
	6	25.5	7.2			
100% RAC 2017 P.Mat.	5.6	25.5	6.7	6.9		0.204529955
	5.8	25.5	6.9			
	5.7	25.5	6.8			
	6	25.5	7.2			

Sede Cayo Santa María					
Elemento	Resistividad (kΩ)	Temperatura	Corrección (kΩ)	Resistividad Media	Desv. Estandar
100% NAC SEDE Cayo Santa María	28.4	23.5	31.7	31.1	1.273939022
	29.1	23.5	32.5		
	27	23.5	30.2		
	26.7	23.5	29.8		
100% RAC (enc. with 51kg/m³)	No results, broken sample				

Punta Matamoros					
Elemento	Resistividad (kΩ)	Temperatura	Corrección (kΩ)	Resistividad Media	Desv. Estandar
100% NAC Pta. M.	26	23.7	29.2	29.3	1.610226169
	24.4	23.7	27.4		
	26	23.7	29.2		
	27.9	23.7	31.4		
100% RAC (enc. with 51kg/m³) Pta. M.	10.1	23.7	11.4	10.9	0.415843139
	9.2	23.7	10.3		
	9.7	23.7	10.9		
	9.6	23.7	10.8		

UCLV					
Elemento	Resistividad (kΩ)	Temperatura	Corrección (kΩ)	Resistividad Media	Desv. Estandar
100% NAC UCLV	25.2	24.1	28.7	30.3	1.038817968
	27.2	24.1	31.0		
	26.9	24.1	30.7		
	26.9	24.1	30.7		
100% RAC (enc. with 51kg/m³) UCLV	10	24.1	11.4	11.2	0.342075257
	10.2	24.1	11.6		
	9.6	24.1	10.9		
	9.6	24.1	10.9		



ARE (Sede Cayo Santa María)



AN( Sede Cayo Santa María)

*Anexos*



AR (Sede Cayo Santa María)



AN (Punta Matamoros)



ARE (Punta Matamoros)



AR (Punta Matamoros)

## Anexos



AN (Facultad de Construcciones)



AR (Facultad de construcciones)



ARE (Facultad de Construcciones)





