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. Carbonatación y Porosidad.

Autor: Evelyn Abreu Báez

Tutor: MSc. Sandra Lichtblau

Santa Clara, Junio 2018

Copyright©UCLV

Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado. Un esfuerzo total es una victoria completa.

Mahatma Gandhi

A mi hermano.

A mis padres que con su amor y luz han guiado mi camino y me han apoyado incondicionalmente.

A mis abuelos por estar siempre a mi lado, por mimarme y apañarme en todo.

Al resto de mi familia, por su cariño y entrega.

A mis amigas Roxana, Zulia, Dayana y Lisbety por su apoyo sin límites en estos tiempos difíciles, por su compañía en los momentos más felices.

A Evey, Damian, Roberto, Alex, Carlos Mario y Enisel, por los momentos compartidos, y sus ánimos.

A Dani Daniel, por su amistad y por toda la ayuda, sin ti esta tesis no hubiese sido posible.

A mi tutora Sandra Lichtblau y mi consultor Fernando Martirena, por la paciencia y dedicación.

A Danitza, Mario, Daniel, Mariam, Aisbel y Amanda por su compañía hasta tarde en los laboratorios.

A los técnicos del laboratorio, Felipe y Yoel, a los profesores Yosvani, Giselle, Eylis y María Betania.

A mis compañeros de aula por todo el tiempo compartido durante estos 5 años.

A los cuartos 108,204 y 206, por su acogida.

A todo aquel que ha contribuido a mi formación profesional.

A todos…

Muchas gracias

Resumen

Reciclar se ha convertido en la palabra de orden en los últimos años y el sector de la construcción no queda exento. Es por esto que son cada vez más los países en sumarse al reciclaje de los residuos de construcción y demolición. En primer lugar el empleo de áridos reciclados supone evitar la extracción de recursos no renovables, impidiendo la degradación de entornos producto de los trabajos de minería. Además permite reducir la cantidad de residuos eliminados en vertederos. Sin embargo el empleo de estos residuos para la producción de hormigones tiende a crear afectaciones en la durabilidad. La porosidad, la permeabilidad, la absorción y la carbonatación son algunos de los factores que comprometen el comportamiento de las estructuras con el paso del tiempo. En el presente trabajo se evalúa el comportamiento de hormigones elaborados con 100% de áridos naturales y 100% de áridos reciclados con respecto a hormigones producidos con áridos reciclados sometidos a un proceso de encapsulación de la fracción 5-9 mm con PZ, todos amasados con cemento P35. Los elementos fueron elaborados en 2016 y 2017 y colocados en diferentes sitios de exposición. Luego de 9 y 17 meses respectivamente, fueron extraídos en formas cilíndricas de 100 mm de diámetro. Posterior a la realización de ensayos, se observa que en todos los casos los elementos elaborados con áridos naturales tienen mejor comportamiento que los hormigones con áridos reciclados; aunque los resultados obtenidos para áridos reciclados encapsulados presentan mejoras y valores cercanos a los hormigones convencionales, haciendo de la encapsulación una alternativa viable para el uso de áridos reciclados.

Palabras claves: árido reciclado, árido encapsulado, durabilidad, permeabilidad, absorción, carbonatación.

Abstract

Recycling has become the word of order in recent years and the construction sector is not exempt. This is why more and more countries join in the recycling of construction and demolition waste. In the first place, the use of recycled aggregates avoids the extraction of non-renewable resources, preventing the degradation of the product environments of the mining works. It also allows reducing the amount of waste disposed in landfills. However, the use of this waste for the production of concrete tends to create impairments in durability. Porosity, permeability, absorption and carbonation are some of the factors that compromise the behavior of structures over time. In the present work the behavior of concretes made with 100% of natural aggregates and 100% of recycled aggregates with respect to concretes produced with 100% recycled aggregates where the fraction of 5-9 mm is encapsulated with Pozzolan Cement(PZ). All concretes were produced with ordinary portland cement P35. The elements were elaborated in 2016 and 2017 and placed in different exposure sites. After 9 and 17 months respectively, cores of 100 mm diameter were extracted from the exposed elements. Test results show a better durability behavior in all cases for the elements elaborated with natural aggregates; results obtained for concrtetes with the encapsulated fraction of recycled aggregates present improvements and values close to conventional concretes, making the encapsulation to a viable alternative for the use of recycled aggregates in concrete.

Keywords: recycled aggregates, encapsulated aggregates, durability, permeability, absorption, carbonation

Introducción 1
Capítulo I. Producción de hormigones estructurales con áridos reciclados. 7
1.1. Residuos de construcción y demolición (RCD) 7
1.1.1. Clasificación de los residuos (de Santos Marián, Delgado et al. 2010) 8
1.2. Áridos reciclados (AR) 9
1.3. Propiedades de los áridos reciclados 9
Granulometría 9
Densidad 10
Porosidad 11
Absorción 11
Mortero adherido 11
Forma y textura 12
1.4. Hormigones con áridos reciclados 12
1.5. Requisitos de los áridos reciclados para su empleo en hormigones estructurales 13
1.6. Propiedades del hormigón reciclado 14
1.6.1. Hormigones reciclados en estado fresco 14
Densidad 14
Aire ocluido 14
Consistencia 14
Compacidad 15
Exudación 15
1.6.2. Hormigones reciclados en estado endurecido 15
Densidad 15
Resistencia a compresión 16
Resistencia a tracción 16
Módulo de elasticidad 17
Resistencia a cortante 17
Resistencia a flexotracción 18
Retracción por secado 18
Fluencia 18
1.7. Parámetros de durabilidad a analizar 19
1.7.1. Porosidad 20

1.7.1.1. Permeabilidad 20
1.7.2. Absorción 21
1.7.3. Resistividad eléctrica 22
1.7.4. Carbonatación 22
1.8. Ensayos para medir durabilidad en hormigones 23
1.8.1. Permeabilidad del aire 23
1.8.2. Resistividad 24
1.8.3. Carbonatación 24
1.8.4. Absorción 25
1.9. Ventajas y desventajas de emplear áridos reciclado para la producción de hormigones 25
1.9.1. Ventajas 25
1.9.2. Desventajas. 26
1.10. Encapsulación del árido reciclado 26
1.11. Experiencias mundiales del empleo de hormigones producidos con áridos reciclados 26
1.12. Experiencias en la producción de hormigones con áridos reciclados en Cuba 29
1.13. Conclusiones parciales 30
Capítulo II. Desarrollo experimental en especímenes de hormigón elaborado con árido reciclado encapsulado y con árido natural. 32
2.1. Introducción 32
2.2. Materiales 32
2.1.1. Dosificaciones logradas 33
2.3. Proceso de encapsulación de la fracción 5-9 mm 34
2.4. Ensayos del hormigón endurecido 34
2.5. Parámetros que determinan la durabilidad de los hormigones. Descripción de métodos y ensayos 35
2.5.1. Ensayo de Permeabilidad del aire 37
2.5.1.1. Justificación 37
2.5.1.2. Descripción del método 38
2.5.1.3. Cálculo del coeficiente de permeabilidad 40
2.5.2. Resistividad eléctrica 42
2.5.2.1. Justificación 42
2.5.2.2. Descripción del método 44
2.5.2.3. Procedimiento 44

2.5.2.4. Factores que influyen 46
2.5.3. Carbonatación 47
2.5.3.1. Justificación 48
2.5.3.2. Descripción del método 48
2.5.3.3. Procedimiento 49
2.5.4. Absorción por capilaridad 50
2.5.4.1. Justificación 50
2.5.4.2. Descripción del método 50
2.5.4.3. Procedimiento 50
2.5.4.4. Cálculo de resultados 52
2.6. Conclusiones parciales 53
Capítulo III Análisis de resultados. 54
3.1. Introducción 54
3.2. Ensayo permeabilidad del aire 54
3.2.1. Control de humedad superficial 54
3.2.2. Análisis de resultados del ensayo de Permeabilidad del aire 55
3.2.3. Comparación con resultados de 2017 57
3.3. Ensayo de Resistividad eléctrica 58
3.3.1. Obtención de valores 58
3.3.2. Corrección de valores 58
3.3.3. Análisis de resultados 59
3.3.4. Comparación con resultados de 2017 61
3.4. Ensayo de Carbonatación 61
3.4.1. Obtención de valores 62
3.4.2. Análisis de resultados 62
3.4.3. Comparación con resultados de 2017 64
3.5. Ensayo Absorción por Capilaridad 65
3.5.1. Chequeo de absorción 65
3.5.2. Cálculo de t_n y Q_n 65
3.5.3. Cálculo y análisis de los coeficientes de absorción 66
3.5.4. Comparación con resultados de 2017 68
3.5.5. Conclusiones parciales 69
Conclusiones 71
Recomendaciones 72

Introducción

El hormigón no es más que el resultado de la unión de uno o más áridos, con agua y algún conglomerante, siendo generalmente este el cemento. Ha emergido claramente como el material de elección para la construcción de un gran número y variedad de estructuras en el mundo de nuestros días. Esto se atribuye principalmente al relativo bajo costo de los componentes a utilizar en su proceso de producción, así como las facilidades técnicas que brinda, tales como rapidez de ejecución y facilidad de asumir variadas formas. Entre sus principales características estructurales se encuentra su gran durabilidad, versatilidad y la alta resistencia a los esfuerzos de compresión, propiedad que se logra gracias a la unión del árido en una matriz del cemento.

El continuo crecimiento de las ciudades y la necesidad de nuevas construcciones, han hecho que la producción de hormigón se dispare a tal índice que lo ha convertido en la segunda sustancia más consumida en el planeta después del agua, aproximadamente 25 mil millones de toneladas de hormigón se producen cada año(Oficemen 2017).De esta forma, el consumo de cemento en España, primer exportador de la Unión Europea, ronda los 13 millones de toneladas en 2017, un 11% más que el año anterior (Oficemen 2018),mientras que el consumo de áridos, según los datos ofrecidos por la Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (ANEFA), se encuentra por los 100 millones de toneladas en el pasado año, lo que representa un crecimiento del 7,5% con respecto a años anteriores.(Profesionaleshoy 2018)

Por otra parte, esta modernización y la necesidad de cambios en torno a las obras de ingeniería, hacen que la producción de residuos ascienda, registrándose entre 221 y 334 millones de toneladas/año en países de la Unión Europea(Valdés Vidal, Reyes-Ortiz et al. 2011), lo que ha hecho que se inicien políticas cuyo enfoque sea la disminución de estos volúmenes de residuos mediante su reutilización, como medida puntual ante la contaminación ambiental.

Conociendo que estas cifras están cada año en aumento y que el uso y producción de hormigón, acarrean grandes costos medioambientales entre los

que se destacan no solo la generación de desechos sólidos, sino además, la enorme cantidad de energía consumida, la emisión de gases a la atmósfera, y la explotación de canteras para la obtención de áridos y materias primas necesarias para la producción, se hace necesario la búsqueda de alternativas que resulten más económicas y sustentables; todo esto sin perder las preciadas características que hacen del hormigón, el material por excelencia de las obras de ingeniería.

Siendo el reciclaje una de las opciones más atractivas y que brinda mayores beneficios en la búsqueda una sociedad más sostenible, y mitigar el uso de recursos no renovables, se ha adoptado en los últimos años la reutilización del hormigón, lo cual no permite reducir las emisiones de CO2 relacionadas con la producción del cemento, pero su reciclaje permite reducir los vertidos y de esta forma recuperar los materiales útiles. Además, el uso de hormigón reciclado reduce la huella ecológica.

La forma más general del reciclaje de hormigón está relacionada con la gestión y tratamiento de los áridos; debido a su empleo en la construcción que abarca desde la creación de hormigón prefabricado, el empleo en morteros, aglomerantes asfalticos, hasta la construcción de carreteras y vías férreas. Según estudios el 20% de los áridos naturales usados actualmente podrían técnicamente ser reemplazados por áridos reciclados productos de desechos y residuos de construcción.

Tomando como base lo anterior, el reciclaje de áridos genera intereses económicos y medioambientales en un mismo punto, donde se crea provecho del problema existente, siendo más factible la eliminación de desechos y donde el aprovechamiento de los mismos produce una nueva materia prima, con lo que se reduce la cantidad de recursos naturales primarios a extraer y disminuye el agotamiento acelerado de las reservas de áridos provenientes tanto de los cauces de los ríos como de las canteras, favoreciendo la protección de recursos limitados. Por otro lado con a la disminución de residuos se limita la aparición de vertederos destinados a estos, minimizando el impacto medioambiental. El uso de áridos reciclados podría en un futuro, compatibilizar el desarrollo económico

de la sociedad con la preservación del medio ambiente que la sustenta, lográndose el desarrollo sostenible.

Situación Problémica

Los áridos resultantes del reciclaje del hormigón presentan una serie de propiedades que divergen de las características del árido natural, siendo generalmente de menor calidad. En dependencia del proceso de trituración al que haya sido sometido, se aprecian variaciones en la densidad, en la absorción de agua y un mayor porciento de desgate en la Máquina de los Ángeles; todo esto relacionado al la cantidad de mortero adherido. Dichas diferencias traen consigo problemas en la producción del nuevo hormigón tales como la laborabilidad y el difícil control de la relación agua/cemento por la presencia de partículas adheridas a los áridos. A su vez genera problemas en la resistencia a compresión siendo ligeramente más baja. Como medida para tratar estas diferencias se trabaja en el procesamiento de áridos, previo al proceso de producción, además de realizar variaciones en la fabricación del hormigón que permitan una mejor adherencia de los áridos a la pasta de cemento.

Uno de estos procesos, aplicado a fin de combatir la alta porosidad presente en el mortero adherido, es la encapsulación de los áridos reciclados. Este método 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)

Partiendo de la aplicación de esta técnica, y de las mejoras que aporta al hormigón, surge el siguiente **Problema científico**

¿Es viable el uso de áridos reciclados encapsulados para la elaboración de hormigón, con respecto a hormigones con áridos naturales, en cuanto a su durabilidad?

Hipótesis

Con hormigones de áridos reciclados encapsulados se obtienen valores de durabilidad similares a los obtenidos de hormigones convencionales, expuestos a cualquier medio.

Objeto de investigación

Durabilidad de hormigón con áridos reciclados encapsulados.

Campo de Acción

Especímenes de hormigón con 100% de áridos reciclados, con fracción 5-9 mm encapsulada, elaborados con cemento Portland de 35 MPa de resistencia a compresión.

Objetivo general

Evaluar la durabilidad de especímenes de hormigón elaborado con áridos reciclados encapsulados.

Objetivos específicos

- Analizar la durabilidad del hormigón con áridos reciclados mediante el encapsulamiento de los mismos.
- Evaluar la durabilidad de las probetas en cuanto a: permeabilidad, resistividad, carbonatación y porosidad de acuerdo a las Normas Cubanas.
- Analizar la influencia de variación de los diferentes parámetros, en la durabilidad del hormigón de acuerdo a las Normas Cubanas.
- Comparar los resultados obtenidos para las distintas probetas evaluadas en los ensayos realizados.
- Comparar los resultados obtenidos para distintas probetas con resultados de investigaciones anteriores.

Tareas científicas

- Revisión bibliográfica acerca de la durabilidad del hormigón con áridos reciclados encapsulados.

- Obtención de los valores de las propiedades de durabilidad de las probetas en cuanto a permeabilidad, resistividad, carbonatación y porosidad de acuerdo a las Normas Cubanas.
- Análisis de la influencia del encapsulamiento de los áridos reciclados en la durabilidad del hormigón.
- Análisis de los valores de las propiedades de durabilidad de las probetas en cuanto a permeabilidad, resistividad, carbonatación y porosidad de acuerdo a las Normas Cubanas.
- Comparación de los resultados obtenidos para las distintas probetas evaluadas en los ensayos realizados.
- Comparación de los resultados obtenidos para distintas probetas con resultados de investigaciones anteriores.

Metodología Científica

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

Tareas técnicas

- Obtención de testigos: NC 318: 2003 Hormigón endurecido — Extracción y preparación de testigos cilíndricos (ASTM C42-94, MOD). Sitios de exposición Punta Matamoros, Sede Universitaria y CIDEM.
- Realización del ensayo de permeabilidad al aire mediante el equipo de medición TORRENT Permeability Tester.
- Realización del ensayo de resistividad mediante el equipo de medición Resipod Family.
- Realización del ensayo de carbonatación en zona carbonatada (25 mm de espesor), NC 355 Profundidad de Carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicios.
- Realización del ensayo de la absorción de agua por capilaridad, según NC 345 Hormigón endurecido, Determinación de la absorción de agua por capilaridad.

Aportes esperados

Práctico

Reducción de la explotación de canteras a tiempo que se sustituye el uso de áridos naturales por áridos reciclados.

Metodológico

Desarrollo de una metodología para el estudio de la durabilidad del hormigón con áridos reciclados encapsulados en hormigones cubanos, para un desarrollo sostenible.

Estructura del trabajo

Capítulo I: Producción de hormigones estructurales con áridos reciclados

Revisión bibliográfica referente a la durabilidad del hormigón elaborado con áridos reciclados encapsulados.

Capítulo II: Desarrollo experimental en especímenes de hormigón elaborado con árido reciclado encapsulado y con árido natural

Materiales y métodos. (Protocolo de ensayos, equipos de medición o experimentación, normas cubanas que respaldan todos estos ensayos realizados, tanto en áridos reciclados como en áridos naturales).

Capítulo III: Análisis de Resultados

Análisis y comparación de los resultados obtenidos de la evaluación de los ensayos reflejados en el capítulo anterior.

Conclusiones

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

Capítulo I. Producción de hormigones estructurales con áridos reciclados.

1.1. Residuos de construcción y demolición (RCD)

El sector de la construcción constituye uno de los renglones más importantes de la economía de un país, de forma tal que consume grandes cantidades de materias primas y recursos para su ejecución, llegando a generar cuantiosos residuos durante los procesos productivos.

Se consideran residuos de construcción y demolición (RCD) aquellos que se generan en el entorno urbano y no se encuentran dentro de los comúnmente conocidos como Residuos Sólidos Urbanos (residuos domiciliarios y comerciales, fundamentalmente), ya que su composición es cuantitativa y cualitativamente distinta.(Romero 2006).

En estos se incluye una variada serie de materiales, entre los que se encuentran productos cerámicos, residuos de hormigón, material asfaltico y en menor medida otros componentes como madera, vidrio, plástico, etc. En la gráfica se muestra un desglose de la composición de estos residuos.

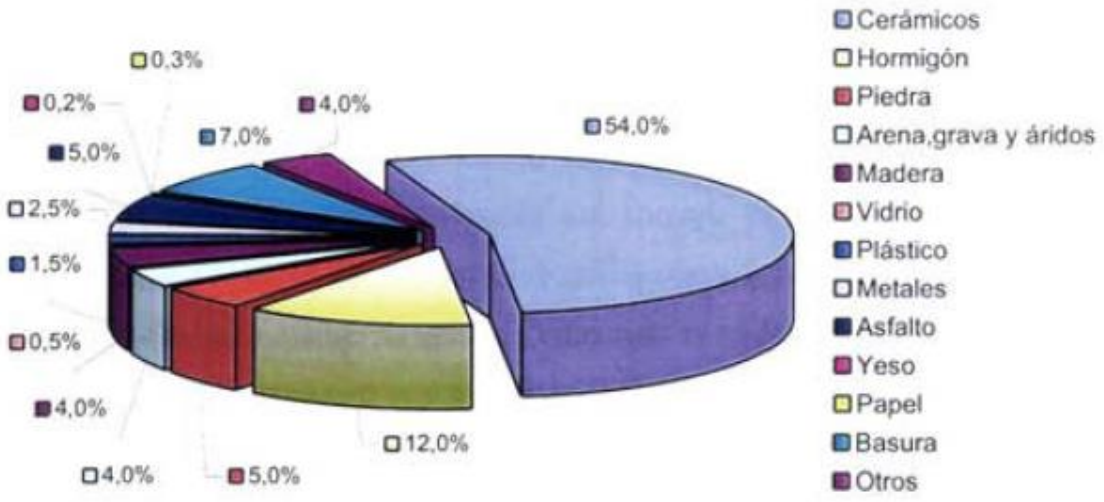


Fig.1.1 Composición de los RCD(Sánchez de Juan 2004)

De forma general se puede decir que son todos los desechos que se producen por el movimiento de tierras y construcción de edificaciones nuevas y obras de infraestructura, así como los generados por la demolición o reparación de edificaciones antiguas.

1.1.1. Clasificación de los residuos (de Santos Marián, Delgado et al. 2010)

Según su origen

- Residuos procedentes de puntos de extracción de áridos o puntos de la obra donde se realicen movimientos de tierras puros, que son residuos de origen pétreo sin contaminación por otras sustancias.
- Residuos procedentes de obras de construcción, que son residuos compuestos fundamentalmente de escombros (el 75%) y otros materiales procedentes de la obra, con una gran cantidad de plástico y papel.
- Residuos procedentes de obras de demolición, que son residuos con composición similar a los de las obras de construcción, pero mucho más contaminados, lo que dificulta su clasificación y gestión.

Según su naturaleza

- Residuos inertes, formados por restos de hormigón, ladrillos, tejas, vidrio y cualquier tipo de tierra o canto.
- Residuos no peligrosos, compuestos por madera, algunos plásticos, papel, yeso, textiles y la mayor parte de los metales.
- Residuos peligrosos, formados por pinturas y disolventes (incluidos los envases), plomo, amianto y sus derivados y residuos radioactivos.

El reciclaje de este tipo de residuos mediante su transformación en áridos reduce la demanda de extracción de materias primas naturales para nuevos emprendimientos en el sector de la construcción. Un propósito ineludible es utilizar materiales distintos de los áridos naturales con el objeto de ahorrar las reservas de áridos naturales para las obras más importantes.

1.2. Áridos reciclados (AR)

Los áridos reciclados son aquellos que se obtienen mediante el procesamiento de RCD. Al igual que los áridos naturales, se pueden caracterizar bien por su fracción granulométrica en: áridos finos y áridos gruesos, y en función de la naturaleza de los residuos se pueden clasificar en: áridos reciclados procedentes de hormigón, áridos reciclados cerámicos o áridos mixtos cuando proceden de una mezcla de residuos de distinta naturaleza.(Sánchez de Juan 2004)

Los áridos reciclados aptos para la elaboración de hormigón estructural son aquellos que se han obtenido de otros hormigones ya que no contienen betún, facilitando la mayor resistencia de la nueva interface que se creará entre la nueva pasta de cemento y los áridos reciclados. Al tratarse al término AR en este trabajo se está haciendo referencia entonces a los áridos reciclados procedentes de hormigones.

1.3. Propiedades de los áridos reciclados

Granulometría

La granulometría de los áridos influye en la docilidad del hormigón, y en la segregación y exudación de la mezcla, o sea, en las propiedades del hormigón a través de la resistencia, estabilidad de volumen y durabilidad.(Beltrán Alverdi 2017)

La granulometría del árido reciclado depende fundamentalmente del sistema de trituración que se haya empleado en su proceso de producción. Los trituradores de impacto, por general, son los que permite alcanzar residuos con mayor volumen en los áridos produciendo como consecuencia mayor cantidad de finos.

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). Además genera finos durante su manipulación debido a la aparición de pequeñas partículas de mortero que se desprenden. La presencia de estas 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.

El módulo granulométrico del AR presenta pequeñas variaciones dependiendo del sistema de trituración y de la calidad del hormigón original. De forma general los áridos procedentes de hormigones de mayor resistencia presentan módulos granulométricos ligeramente superiores a los procedentes de hormigones menos resistentes en igualdad de sistema de trituración. Este módulo disminuye a medida que se producen varias etapas de trituración por la disminución del tamaño de los áridos.

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. (Pérez Benedicto 2011)

Los procesos de producción, el tamaño de las fracciones y el grado de contaminación son factores determinantes para la variación de la densidad de los áridos reciclados.

Combinando trituradoras de impactos y trituradoras de conos o machacadoras de mandíbulas, en el proceso de producción, se obtienen áridos reciclados de muy buena calidad ya que se consigue reducir en mayor proporción la cantidad de mortero adherido a los áridos originales. Así, dichos áridos alcanzan un valor correspondiente al 90% de la densidad del árido natural, según Nagataki, después de haberlos sometido a dos etapas sucesivas de triturado mediante machacadora de mandíbulas y trituradora de impactos. Dicho valor alcanza el 95%cuando son cuatro las etapas de trituración.

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

Porosidad

El árido reciclado tiene una alta porosidad, estudios realizados al respecto han demostrado que la penetración de agua es de dos a tres veces superior a los áridos naturales.

Estudios realizados han demostrado que, con el uso de separadores de densidad industriales y áridos reciclados seleccionados procedentes de RCD con densidades superiores a 2.2kg/dm3, se producen áridos con baja porosidad (menos de 17%), permitiendo así la producción de árido reciclado con un buen rendimiento para la producción de hormigón. (Alaejos 2008)

Absorción

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

En áridos reciclados se alcanzan valores muy superiores a los obtenidos en áridos naturales. Los valores de absorción en áridos naturales 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 limite de un 7% establecido por la norma española EHE -08(ARENAS 2012)

El sistema empleado en el proceso de los RCDs para la obtención de áridos reciclados permite reducir la absorción, ya que a medida que lo RCDs pasan por diferentes trituradoras, la cantidad de mortero adherido a los áridos disminuye.

Mortero adherido

Una de las principales diferencias entre áridos reciclados y naturales estriba en la cantidad de mortero adherido que incorporan los primeros debido al hormigón del que proceden.

La cantidad de mortero adherido hace que los áridos reciclados presenten propiedades distintas a los naturales, que se reflejan en un aumento de la absorción de agua, menor densidad, menor resistencia, menor dureza y una

menor resistencia a la fragmentación. Por consiguiente, el hormigón fabricado con estos áridos estará condicionado negativamente por dichas propiedades, reflejándose en la fluencia, retracción, modulo de elasticidad del nuevo hormigón. Por tanto, cuanto mayor sea el contenido de mortero adherido en los áridos reciclados, más afectaciones presentara el hormigón fabricado con él.

Forma y textura

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 laborabilidad. (ARENAS 2012)

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.

1.4. Hormigones con áridos reciclados

El uso de áridos reciclados influye en la calidad del hormigón, debido al comportamiento débil de la interface entre la pasta de cemento y el árido, generalmente sucede por el procedimiento de fabricación y la humedad de los áridos. El módulo de elasticidad, la retracción y la fluencia son de las propiedades que se ven más afectadas, a mayor resistencia del hormigón reciclado. Por este motivo, resulta conveniente limitar la resistencia máxima admisible del hormigón reciclado. Los resultados alcanzados indican que la pérdida de capacidad mecánica del hormigón reciclado hasta 50 N/mm2 es menor especialmente si se utilizan porcentajes de árido reciclado no superiores al 20%.

Propiedades como la adherencia de la pasta a los áridos reciclados, la trabajabilidad de las mezclas y la resistencia a compresión disminuyen de forma proporcional al contenido de áridos reciclados utilizados en la mezcla, mientras que otras propiedades negativas como el contenido de aire, la fluencia y la retracción por secado aumentan de igual forma según el por ciento de sustitución de áridos naturales por áridos reciclados.(Ulloa Mayorga)

Los áridos reciclados no deben, por tanto ser utilizados en la fabricación de hormigones de alta resistencia.

El riesgo de carbonatación en el hormigón con AR es mayor que en hormigón convencional, aunque una adecuada mezcla de los materiales durante su fabricación puede mejorar la resistencia a la penetración del CO_2 . (1999)

Por otra parte, el uso de árido reciclado fino, afecta en mayor medida las propiedades del hormigón, dando pie a una mayor retracción por secado y una menor durabilidad del hormigón respecto a uno con árido natural, por lo que su utilización para uso estructural generalmente no se recomienda (Ulloa Mayorga)

1.5. Requisitos de los áridos reciclados para su empleo en hormigones estructurales

Para el uso de estos áridos en hormigones estructurales se recomienda su combinación con árido natural grueso, con un porcentaje máximo recomendable del 20% de árido reciclado, siempre y cuando este se encuentre dentro de la fracción gruesa (tamaño máximo>4 mm).

En la tabla aparecen indicadas las especificaciones que deben exigirse al árido reciclado y las que deben cumplir el árido natural. (Pablo and Rodríguez 2016)

Tabla 1.1.Especificaciones para áridos naturales y reciclados

	AR	**AN**	**Límite Árido Mezcla (20%AR+80%AN)**
Absorción	≤7%	≤4.5	≤5%
Terrones de arcilla	≤0.6%	≤0.16%	≤0.25%
Impurezas	-	-	-
Ladrillo	≤5%	-	≤1%
Asfalto	≤1%	-	≤0.2%
Otras impurezas(plástico, vidrio, papel)	≤1%	-	≤0.2%
Porcentaje de arena	≤7.5%	≤4.4%	≤5%

1.6. Propiedades del hormigón reciclado

1.6.1. Hormigones reciclados en estado fresco

Densidad

Debido a la menor densidad que presenta el árido reciclado por la presencia del mortero adherido, los hormigones en estado fresco, elaborados con estos áridos, presentan menor densidad en relación con los valores de densidad de hormigones convencionales.

Generalmente los valores de densidad de áridos reciclados oscilan entre 2,13 y 2,40 kg/dm^3, mientras que estos valores para áridos naturales tienen valores de 2.23 y 2.41 kg/dm^3. De esta forma los hormigones obtienen valores de densidad proporcionales a los áridos con los que son elaborados.

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)

Consistencia

La consistencia es la mayor o menor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse y consiguientemente para ocupar todos los huecos del molde o encofrado.

En hormigones con áridos reciclados, factores como: granulometría, dosificación del cemento, agua de amasado y forma del árido, son determinantes para la consistencia de la mezcla. Por tener estos áridos elevados valores de absorción, es necesario un control de la cantidad de agua durante el proceso de amasado, a mayor 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.(ARENAS 2012)

Compacidad

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

La compacidad es inversamente proporcional al 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.

Exudación

La exudación se produce por el ascenso del agua de amasado en la mezcla de hormigón fresco, como consecuencia de la incapacidad de los áridos de arrastrarla con ellos al compactarse.

Si el árido reciclado que se emplea en la fabricación de hormigón se utiliza previamente saturado, la exudación será similar a la de los hormigones convencionales. Si el árido reciclado se utiliza seco, la exudación del hormigón fabricado con árido reciclado presentara valores muy por debajo de los correspondientes al hormigón de control. Esto es debido a la elevada absorción del árido reciclado, por lo que el hormigón retiene mayor cantidad de agua.(ARENAS 2012)

1.6.2. Hormigones reciclados en estado endurecido

Densidad

Al igual que el caso del hormigón reciclado en estado fresco, la menor densidad del árido reciclado hace que la densidad del hormigón ya endurecido sea por debajo de los valores para hormigones convencionales.

Se ha determinado que los valores de reducción de la densidad se encuentran en el orden de 4% -15% sobre la densidad del hormigón con árido natural para hormigones con 100% de árido grueso reciclado, siendo el porcentaje de sustitución del árido natural por el árido reciclado el factor más influyente en la densidad del hormigón reciclado.(Sánchez de Juan 2004, López Gayarre 2008)

Resistencia a compresión

La evolución de la resistencia a compresión de hormigones con áridos reciclados es similar a la de los hormigones fabricados con áridos naturales, durante las primeas semanas. Luego de esto se aprecia una disminución en los valores de resistencia de los hormigones reciclados con respecto a los convencionales, siempre que se mantenga la misma relación agua/cemento. Esta disminución se hace más significativa a medida que aumenta el porcentaje de árido grueso sustituido.

Entre los factores que pueden producir esta disminución se encuentran

- La cantidad de mortero adherido a la matriz rocosa, que produce una menor resistencia al árido reciclado, en comparación con el árido natural
- El aumento de zonas débiles en el hormigón endurecido, debido a la superficie de contacto entre el árido reciclado y el mortero adherido, además del aumento del aire ocluido
- La cantidad de agua total en la mezcla, influye en la resistencia ya que la capacidad de absorción puede alterar la relación agua/cemento.

En los estudios consultados, en los que se sustituye únicamente el árido grueso, las pérdidas de resistencia son muy pequeñas cuando el porcentaje de sustitución no supera el 30%. Cuando el porcentaje sustituido es del 50% la resistencia varia en una horquilla comprendida entre una ganancia puntual del 5% y pérdidas de hasta el 16%. Cuando dicho porcentaje aumenta al 100% las pérdidas de resistencia oscilan entre el 1% y el 23%.

Cuando se sustituyen íntegramente el árido grueso y el árido fino las pérdidas de resistencia se hacen más acusadas situándose en una horquilla comprendida entre el 6% y el 30%. Algún estudio puntual, en el que se han utilizado áridos saturados, presentan resultados en los que llegan a producirse incrementos en la resistencia de hasta el 16%.(ARENAS 2012)

Resistencia a tracción

En general, la resistencia a flexión o tracción y el modulo elástico de los hormigones fabricados con árido reciclado suelen ser proporcionales a la resistencia a compresión obtenida. (Sánchez Rodríguez 2011)

Los valores de resistencia a tracción para hormigones con áridos reciclados son similares a los que se obtienen para áridos naturales. Estudios indican que las pérdidas de resistencia a tracción son muy pequeñas cuando el porcentaje es inferior al 50%, tanto sustituyendo árido grueso o árido fino. 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%.(ARENAS 2012)

Los valores aproximados para dicho parámetro varían desde el 8 % y el 12 % del valor de su resistencia a compresión y están determinados para la edad de los 7 y 28 días.(Nuñez 2014).

Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad de la pasta que envuelve los áridos reciclados es inferior al del árido y al del hormigón. Debido a esta circunstancia, los áridos reciclados presentaran un modulo de elasticidad inferior al de los áridos naturales y, por consiguiente, el modulo de elasticidad del hormigón reciclado será inferior al del hormigón convencional.(ARENAS 2012)

Esta reducción se debe a la textura superficial más rugosa de los áridos reciclados y las pequeñas micro fisuras que puede presentar el mortero adherido.

Según los datos, observamos que en hormigones con sustitución del árido grueso en un porcentaje que no sobrepase el 30% la caída del valor del módulo se sitúa en torno del 4% al 10%. Cuando la sustitución llega hasta el 50% del árido grueso la reducción que experimenta el módulo de elasticidad puede llegar al 20%. Si el árido grueso sustituido es del 100% la reducción del módulo aumenta llegando a alcanzar valores del 50%. Cuando también se sustituye el árido fino dichas reducciones llegan, en casos puntuales, hasta el 80%.(Coquillat 1982)

Resistencia a cortante

Para hormigones con áridos reciclados la resistencia a cortante alcanza valores de disminución de 26% cuando se sustituye únicamente el árido grueso, cuando además se sustituye el árido fino, la disminución puede ser de hasta 41%. Sin

embargo, para sustituciones del 50% del árido grueso, se aprecia buen comportamiento para esta propiedad.(ARENAS 2012)

Resistencia a flexotracción

Similares a las variaciones en la resistencia a tracción en función del porciento de árido sustituido se encuentra la resistencia a flexotracción. Cuando la sustitución del árido grueso es inferior al 50 % las reducciones resultantes son pequeñas, no siendo así en el caso de una sustitución del 100% del árido grueso natural por árido grueso reciclado. Si realizamos una sustitución del 100% del árido grueso y fino, los valores son aún mayores siendo desde un 15% hasta un 29%.(Ulloa Mayorga)

Retracción por secado

La retracción se describe como la disminución del volumen del hormigón con el tiempo, debido al cambio del contenido de humedad del hormigón y cambios físico-químicos.

En los hormigones reciclados la retracción por secado es mayor que en los convencionales. Dicho aumento puede ser debido, entre otras causas, a que el módulo de elasticidad del árido reciclado es inferior al del árido convencional por la cantidad de mortero que lleva adherido, a la mayor cantidad de agua empleada en su dosificación para conseguir la misma consistencia que en el hormigón convencional y por la mayor absorción del árido reciclado. (ARENAS 2012)

Cuanto mayor sea el tamaño máximo del árido, mayor será la retracción ya que se necesitara una cantidad menor de pasta para la fabricación del hormigón. La retracción también disminuye al incorporar las fracciones mayores del árido menor cantidad de mortero adherido.

Fluencia

La fluencia es la deformación irrecuperable de la probeta, a partir de la cual sólo se recuperará la parte de su deformación correspondiente a la deformación elástica, quedando una deformación irreversible. Este fenómeno se sitúa justo encima del límite elástico, y se produce un alargamiento muy rápido sin que varíe la tensión aplicada.

Debido a la incorporación del mortero adherido en los áridos reciclados, los valores experimentados en hormigones con dichos áridos son superiores a los índices para hormigones convencionales.

A medida que aumenta el porcentaje de árido sustituido mayor es la fluencia. Cuando la sustitución del árido grueso no es superior del 50% la variación no es superior del 22%. En sustituciones del 100% del árido grueso los valores oscilan entre 30% y 65%.(ARENAS 2012)

1.7. Parámetros de durabilidad a analizar

La durabilidad de una estructura es la capacidad para soportar, durante su vida útil, las condiciones físicas y químicas a las que va a estar expuesta, conservando sus condiciones de funcionalidad y aspecto, sin costes inesperados de mantenimiento o reparación. (Bañón and Varona Moya 2012)

La falta de durabilidad puede deberse al medio al que está expuesto el concreto, o a causas internas del concreto mismo. Las causas externas pueden ser físicas, químicas o mecánicas; originadas por condiciones atmosféricas, temperaturas extremas, abrasión, acción electrolítica, ataques por líquidos y gases de origen natural o industrial. El grado de deterioro producido por estas agentes dependerá principalmente de la calidad del concreto (…) Las causas internas son: la reacción álcali-agregado, cambios de volumen debidos a diferencias entre las propiedades térmicas del agregado y de la pasta de cemento y sobre todo la permeabilidad del concreto; este factor determina en gran medida la vulnerabilidad del concreto ante los agentes externos y por ello un concreto durable debe ser relativamente impermeable.(Rivera 2010)

Este es el campo menos estudiado den el hormigón reciclado, y los resultados son dispersos. Sin embargo, de forma general, la mayor porosidad que presenta el hormigón reciclado le hace más susceptible a sufrir los efectos del ambiente, por lo que en muchas normativas se restringe su uso al caso de ambientes no agresivos. (Sánchez de Juan 2004)

1.7.1. Porosidad

Un medio poroso se compone de una fase sólida y de un espacio poroso o volumen de vacíos. En el hormigón endurecido, constituido por agregados, pasta y aire, se deben tener en cuenta los vacíos presentes en los agregados y en la pasta, que representan entre el 8 % y el 25 % del volumen total. Usualmente, el aire incorporado se presenta como poros no conectados, teniendo una escasa influencia en los mecanismos de transporte de fluidos. Las propiedades de transferencia de materia en medios porosos dependen tanto de la distribución de tamaño de poros como de su conectividad.
En lo que respecta a los procesos de durabilidad, los poros más críticos son los comprendidos entre 10-2 m hasta 10-7 m (poros de compactación, aire ocluido y poros capilares).(Mattio 2014)

La variación de la porosidad capilar de la pasta afecta directamente la resistencia mecánica y el coeficiente de permeabilidad al agua. A medida que la porosidad se reduce, la resistencia se incrementa (f´c), como consecuencia del incremento a nivel microscópico de las fuerzas de unión, de la disminución en el tamaño y conectividad de los poros. (Mattio 2014)

1.7.1.1. Permeabilidad

La permeabilidad en el concreto se refiere a la cantidad de migración de agua u otras sustancias liquidas por los poros del material en un determinado tiempo; y así ser el resultado de: la composición de la porosidad en la pasta de concreto, la hidratación o la asociación con la liberación de calor o calor de hidratación y evaporación del agua de mezcla, la temperatura del concreto, y la formación de cavidades y grietas por contracción plástica en el concreto durante el tiempo de fraguado.(Vélez 2010)

La mayoría de los procesos de degradación del hormigón dependen de su permeabilidad. El coeficiente de permeabilidad es una característica propia del material que describe el paso de sustancias.(Sánchez de Juan 2004)

La permeabilidad del concreto es importante también en relación al lo hermético de las estructuras que retienen líquidos. Además, la penetración de humedad en el concreto afecta sus propiedades de aislamiento. No es solamente función de su porosidad, sino que depende también del tamaño, la distribución de partículas y la continuidad de los poros. (Rivera 2010)

El transporte de agua a través del hormigón viene determinado por el tipo, tamaño, distribución e interconexión de los poros y fisuras. Estos factores determinan la permeabilidad del hormigón, que en el caso de AR es considerablemente superior a la del árido natural y a su vez, ésta condiciona decisivamente la durabilidad. La incorporación del árido reciclado en el hormigón representa un aumento de varios factores que afectan la durabilidad entre estos la permeabilidad, aunque el resultado final depende también de las características de la nueva matriz cementante. Finalmente la permeabilidad es de 2 a 3 veces mayor que la del hormigón de control. (Robas 2009)

1.7.2. Absorción

La absorción capilar es el mecanismo de transferencia de líquidos más rápido, y la determinación de la capacidad de absorción capilar constituye una herramienta confiable para caracterizar la estructura de poros en forma comparativa. (Mattio 2014)

La porosidad del hormigón, está definida como la cantidad de espacios vacíos que quedan inmersos dentro de la masa del material, como consecuencia de la evaporación del agua libre de la mezcla y de la presencia de aire naturalmente atrapado. Comparando el árido reciclado con el árido natural, se observa que la principal diferencia es la porosidad total. Una vez producida la entrada del agua desde la superficie mojada (permeabilidad), ésta circula por el hormigón en función de su porosidad, transportando a su vez las sustancias agresivas disueltas. El aumento de la porosidad en estos casos es de 1,5 a 2 veces mayor que la del hormigón convencional. Con la introducción de árido reciclado crece

también el tamaño medio de los poros que junto a las grietas que ya llevan los áridos, afecta la durabilidad de los elementos de AR.(Robas 2009)

La absorción no se puede utilizar como una medida de la cantidad del concreto, pero casi todos los concretos buenos tienen una absorción debajo del 10% por masa; si se va a calcular el volumen ocupado por el agua, se necesita tomar en cuenta la diferencia en el peso específico del agua y del concreto.(Orozco 2004)

En los hormigones con áridos reciclados la porosidad es un factor clave en la absorción de agua presentando valores entre el 4-16% mayor que en los hormigones de control, según estudios realizados. La mayor porosidad del hormigón reciclado se debe a la mayor porosidad del árido reciclado a causa del mortero adherido que presentan.

1.7.3. Resistividad eléctrica

Los áridos densos normalmente son aislantes por su alta resistividad eléctrica, esta característica causa el efecto de dilución de la resistividad, medida en la matriz conductiva y el re direccionamiento de la corriente alrededor de los mismos, el cual se traduce en el aumento de la tortuosidad.(Shane, Mason et al. 2000)

En un medio poroso como el hormigón, la resistividad refleja la capacidad de transportar carga eléctrica en los iones disueltos en la fase acuosa de un determinado volumen, pidiéndose asumir a los áridos como eléctricamente inertes ya que su resistividad resulta varios órdenes de magnitud superior a la de la solución de poros.

1.7.4. Carbonatación

Entre las agresiones ambientales al hormigón, una de las más comunes en las ciudades es la del dióxido de Carbono, CO2, el cual, unido a la humedad ambiental, ingresan al hormigón a través de sus poros. (Hugo, Pérez et al. 2003)

Cuando esto sucede, reacciona el CO2 con el hidróxido de calcio del hormigón (Portladita) y los compuestos hidratados del cemento, formándose carbonato de calcio. Esto produce una reducción del pH hasta valores inferiores a 9. Este proceso se caracteriza por la presencia de un frente carbonatado, el cual separa zonas de un pH diferente, una zona de pH menor a 9 y una con pH mayor a 12. (Balaguera and Porras 2009) Este proceso se conoce como carbonatación

Según la **NC 355 2004**: la carbonatación es la reducción de la alcalinidad del hormigón por acción de los componentes ácidos de la atmósfera dióxido de carbono (CO2) y de azufre (SO2).

Además del efecto en la corrosión del refuerzo, la carbonatación puede dar lugar a aumentos en las resistencias a tracción y compresión de las zonas afectada, así como a tensiones y microfisuraciòn.(García, Perdrix et al. 2011)

El árido reciclado puede funcionar como un foco de propagación de la carbonatación, porque no impide el paso del CO2 como un árido convencional, por lo que se debe tener un especial cuidado con la carbonatación.

1.8. Ensayos para medir durabilidad en hormigones

1.8.1. Permeabilidad del aire

En los últimos años, se han desarrollado diferentes técnicas para la medida de la durabilidad potencial, que se apoyan, en general, en la medida de la capacidad de transporte del hormigón. Una de las técnicas es la medición de la permeabilidad del aire por el Método de Torrent, con el uso del Torrent Permeability Tester (TPT).

El equipo TPT, mediante un ensayo no destructivo, crea un vacío dentro de una celda colocada sobre la superficie del hormigón, y registra la variación de presión a partir del primer minuto de operación con intervalos constantes y muestra, en tiempo real, la evolución de la pérdida de vacío con la raíz cuadrada del tiempo. Los datos de la medición son procesados e indica el valor del coeficiente de permeabilidad**.** (Dobel 2013)

1.8.2. Resistividad

La resistividad eléctrica del hormigón es función de la porosidad del material (o sea, también función del tiempo), la composición química (conductividad) de la solución de poros y el número y distribución de poros (conectividad, tortuosidad) como resultado de las proporciones de la mezcla y su interacción con el medio.

Es una medida volumétrica de resistencia eléctrica que a partir de la ley de Ohm relaciona voltaje y corriente aplicada. Se emplea para analizar la resistencia del hormigón. Se incrementa cuando el hormigón se seca y cuando se carbonata, en particular, para los hormigones de cemento Portland.

La determinación de la resistividad del hormigón puede realizarse por diferentes métodos, aunque para mediciones in situ son más corrientes los métodos que emplean electrodos puntuales.(Torrens 2010)

1.8.3. Carbonatación

La NC 334: 2004 establece el ensayo para determinar la carbonatación en hormigones endurecidos, con el propósito de conocer si la profundidad de carbonatación ha alcanzado o no a la armadura de refuerzo.

El método se basa en el uso de fenolftaleína en disolución con agua y alcohol etílico, con el cual se pulverizan las muestras previamente cortadas con dimensiones de 25 y 30 mm, para medir el avance del frente de carbonatación, para determinar la reducción de la alcalinidad provocada por las transformaciones químicas derivadas del proceso.

La fenolftaleína toma un color púrpura para valores de pH superiores a 9.5 (hormigón no carbonatado) y se vuelve incolora en valores inferiores a 8 (hormigón carbonatado). Para valores entre 8 y 9.5 cm toma tonalidades entre rosa y rojo púrpura.

1.8.4. Absorción

La **NC 345:2005** establece el método para determinar la absorción de agua por capilaridad en hormigones endurecidos mediante el método de ensayo propuesto por Göran Fagerlund.

Consiste en la colocación de las muestras en un recipiente estanco con agua, sobre unos apoyos de madera. Los resultados se obtienen a partir de la medición del aumento del peso de cada uno de los elementos, con el transcurso de tiempo, hasta obtenerse valores constantes.

1.9. Ventajas y desventajas de emplear áridos reciclado para la producción de hormigones

1.9.1. Ventajas

- El uso de RCD minimiza los residuos de concreto; este material reciclado puede ser utilizado dentro de la misma área de generación.
- Disminución en el consumo de energía a partir del transporte y la producción de agregados. Esto puede ayudar a mejorar la calidad del aire mediante la reducción de emisiones de las fuentes de transporte.
- Beneficios económicos, teniendo en cuenta la situación y las condiciones locales como la cercanía y cantidad de agregados naturales disponibles. Además, el costo de enviar residuos a los sitios de disposición final muchas veces puede ser superior al costo de separar y vender los residuos de concreto, de un sitio de construcción a un agente reciclador.
- La reutilización de los escombros de la demolición de concreto, reduce cantidades antiestética de escombros de concreto, de los que se reduce los impactos al paisaje
- La durabilidad del concreto reciclado significa que su larga vida útil puede presentar ventajas en sostenibilidad frente a otros materiales de construcción.
- Reducción de explotación de canteras para el suministro de materias primas.(LIZARAZO 2015)

1.9.2. Desventajas.

- Meticuloso procesamiento de residuos de construcción y demolición para la obtención de áridos.
- El tiempo empleado para el estudio de las características del árido elaborado en el proceso de trituración.
- Generación de polvo, ruidos, y vibraciones producidas en las operaciones de tamizado y machaqueo en las plantas de procesado de los áridos.
- Posibles impactos sobre la salud, causadas por el inadecuado manejo de residuos.
- Variación en las propiedades del hormigón, producto de las características de los áridos reciclado empleados en su producción.

1.10. Encapsulación del árido reciclado

Para corregir el problema de la absorción del agua, se ha tomado como practica la encapsulación del material. Este proceso consiste en colocar una capa fina de cemento hidratado que rellene los poros que quedan en los áridos tras el proceso de machaqueo. Esta capa, conlleva a una densificación de la estructura porosa, evitando que el agua sea absorbida.

Este proceso, busca además una disminución de la relación agua/cemento, por lo que se recubre la fracción intermedia, así la película formada reduce la absorción de agua y asegura la resistencia y durabilidad del hormigón**.**(Rios Contreras 2017)

1.11. Experiencias mundiales del empleo de hormigones producidos con áridos reciclados

Holanda, Bélgica y Dinamarca.

Debido a la escasez de materias primas para la obtención de áridos vírgenes, y la dificultad de encontrar emplazamientos para vertederos; estos países mantienen altísimo grado de reciclaje para la fracción de hormigón, ladrillos y tejas, además de reciclaje del 100% del asfalto procedente del residuo de construcción de carreteras(Romero 2006)

Holanda

Se empleó hormigón reciclado para la construcción de los estribos de un viaducto en la carretera RW 32 cerca de Meppel en 1988. Además en las obras de la compuerta del puerto en las proximidades de Almelo para la construcción de la losa de hormigón bajo el agua. Debido a los buenos resultados obtenidos en la utilización de hormigón reciclado, desde 1991 se exige la utilización de árido de hormigón reciclado en un porcentaje del 20% de la fracción gruesa en todos los proyectos de hormigón, con excepción de las estructuras de hormigón pretensado.(Alaejos 2008)

Bélgica

Tras la demolición de los muros del puerto de Antwerp en 1987, se optó por la utilización de los 80.000 m3 de escombros, para la producción de hormigón reciclado. Como parte del proceso, se optó por presaturar los áridos reciclados antes de incorporarlos a la mezcla, corrigiendo así la cantidad de agua añadida. (Alaejos 2008)

Dinamarca

Como parte de la construcción del"Great Belt Link", red de enlace entre Dinamarca y Suecia, fue necesaria la demolición de varias estructuras, entre las que se encontraba la demolición de un puente de hormigón armado. En esta demolición se llevaron a cabo distintas investigaciones sobre técnicas de demolición y utilización del hormigón triturado como árido para un nuevo hormigón. Los escombros fueron procesados y empleados en la fabricación de hormigón, que se utilizó para la construcción de "La casa reciclada", en Odense y las cimentaciones de pantallas acústicas.(Alaejos 2008)

Finlandia, Austria y Reino Unido

Los factores que en estos países han impulsado el reciclaje, residen en una política de gestión de residuos que ha utilizado instrumentos de tipo económico (impuestos sobre el vertido) y legales (obligación de demoler selectivamente, acuerdos voluntarios, planificación y control). Actualmente reciclan entre el 40 y

45% de los residuos básicos de construcción y demolición y entre el 50 y el 76% de la corriente de hormigón, ladrillos, tejas etc.(Romero 2006)

Reino Unido

La primera experiencia práctica en la que se utilizó hormigón con áridos reciclados en el Reino Unido se llevó a cabo en Watford en el año 1995 durante la construcción de un bloque de oficinas. Se empleó hormigón triturado procedente de la demolición de un edificio de 12 plantas en el centro de Londres. El árido grueso se utilizó para la construcción de cimentaciones, pilares y forjados.(Alaejos 2008)

Suecia, Alemania y Francia

Estos países reciclan entre el 15 y 20% de los residuos básicos de construcción y demolición.(Romero 2006)

Alemania

En 1993-1994 se construyó la sede de la Fundación Alemana para el Medioambiente
(Deutsche Bundesstiftung Umwelt). Se empleó árido reciclado en la construcción de los elementos estructurales de hormigón, realizándose una estricta selección de los áridos reciclados y exhaustivo control de calidad. Se utilizaron 290 kg/m3 de Cemento Portland CEM I 42,5 R; el árido grueso era reciclado (con tamaños comprendidos entre 4 y 32 mm) y el árido fino arena natural.

Para la construcción de grandes bloques de hormigón como elementos decorativos en el Centro de Exposiciones de Magdeburg (1999). Estos bloques se encuentran en el exterior y en contacto con agua. En este caso, solo se empleó árido grueso reciclado.(Alaejos 2008)

Italia, Irlanda, Portugal, Grecia y España

Estos países presentan una situación de reciclaje de RCD que se encuentra alrededor del 6 y el 9%, en ocasiones inferior, aunque están impulsando el reciclaje de estos residuos.(Romero 2006)

España

El puente de Marina Seca, una de las obras emblemáticas del FOURM 2004 de Barcelona, fue construido utilizando hormigón reciclado en alguno de sus elementos. Se utilizó un árido reciclado de un único origen (fracción 4/25 mm). Se utilizó una sustitución del 20% de árido reciclado previamente presaturado.

Puente atirantado sobre el rio Turia

Propone la utilización de hormigón reciclado en un puente atirantado de hormigón armado, situado en Manises, propiedad de la Diputación de Valencia. Este puente se ejecutará como sustitución de una estructura de hormigón ya existente. El objetivo del proyecto es reciclar el material de hormigón procedente de esta estructura para la fabricación de parte del hormigón de la nueva estructura, utilizando una sustitución del 20% del árido natural por árido reciclado en el hormigón de un tramo de la losa.(Alaejos 2008)

Colombia

La cantidad de residuos de construcción y demolición que son aprovechables son muy bajos, en comparación distintos países Europeos, ya que solo en Bogotá es de cumplimiento obligatorio para las obras públicas y privadas el reciclado de RCD, no obstante, se inician los estudios y las investigaciones para comenzar a utilizar hormigones reciclados con los que se pueda lograr un ahorro considerable mediante la reducción en la utilización de materiales naturales y los costos de la disposición de residuos. (LIZARAZO 2015)

1.12. Experiencias en la producción de hormigones con áridos reciclados en Cuba

En Cuba las actividades de crecimiento que implican obras de construcción, ampliaciones o remodelaciones, son fuentes permanentes de producción de grandes cantidades de RCD. Los habitantes de las ciudades soportan los efectos de la acumulación desordenada de estos residuos en vías y áreas públicas y el deterioro de su entorno urbano, así como las demás implicaciones y afectaciones al medio ambiente.

La Habana

Aunque no a gran escala, existe experiencia en el tratamiento de los RCD, debido a que existen dos plantas de reciclaje en la Habana, solo una operativa, que pertenece a la Oficina del Historiador. Esta se encarga de procesar residuos de cerámica, mampostería y hormigón.

Se ha implementado un proyecto de cooperación internacional para reutilizar residuos de construcción y demolición para producir materiales en la localidad. Según datos estimados de la Oficina Nacional de Estadísticas e Información, en La Habana se generan 1.200 m3 de escombros diariamente, por lo que cualquier alternativa local a la reutilización de áridos beneficiaría la protección de las canteras existentes y liberaría a la ciudad de la inutilización de espacios que se encuentra ocupados por estos residuos. El proyecto Apoyo al Hábitat comenzó a ejecutarse en 2007 en el Centro de Investigaciones y Desarrollo de Estructuras y Materiales, de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas y cuenta con la colaboración financiera de la Agencia Suiza de Cooperación para el Desarrollo, entre otras instituciones.(Fernàndez 2016)

Villa Clara

El municipio de Manicaragua cuenta con una planta, de pequeña escala, para reciclar desechos en la producción de materiales de construcción. Los resultados son positivos y se logra reciclar casi la totalidad de desechos que se generan.(Luna 2018)

1.13. Conclusiones parciales

- La recuperación y reciclado de RCD es parte indispensable del combate para el futuro: es conseguir y compatibilizar el desarrollo económico de la sociedad con la preservación del medio ambiente que la sustenta.
- A través del reciclaje de los RCD se obtienen nuevos áridos que pueden ser reutilizados y comercializados como materiales constructivos completos. Con mínimas transformaciones se puede obtener: hormigón, rellenos de canteras, ladrillos, gravas para jardines, bases y sub-bases de pavimentos para carreteras, etc.

- Los residuos provenientes de la construcción son empleados en hormigones como áridos gruesos y finos, presentando una serie de propiedades que divergen de las propiedades del árido natural, sin embargo con el manejo de ellos se alcanzan resultados satisfactorios en el hormigón reciclado.
- La durabilidad e los elementos elaborados con hormigones reciclados, se ve afectada en dependencia del porciento de sustitución de los áridos, la relación agua/cemento y de la cantidad de mortero adherido en los áridos; incrementando factores como la porosidad, haciendo más vulnerables las mezclas.
- Estudios realizados, señalan que la sustitución del 20% del árido natural, por áridos reciclados, produce afectaciones despreciables, desde el punto de vista estructural de los hormigones producidos con estas dosificaciones, sin embargo, la resistencia va disminuyendo a medida que se incrementa el porciento de sustitución. Se aprecian afectaciones considerables en hormigones donde son sustituidos al 100% los áridos naturales por los reciclados.

Capítulo II. Desarrollo experimental en especímenes de hormigón elaborado con árido reciclado encapsulado y con árido natural.

2.1. Introducción

El presente estudio es la continuación del trabajo desarrollado por la Ing. Beatriz Beltrán Alberdi, se toman los valores obtenidos de su estudio y se emplean como base para el desarrollo de la presente investigación.

En este capítulo se presenta de manera secuencial, el desarrollo experimental llevado a cabo para la evaluación de la durabilidad de las muestras de hormigón con áridos reciclados encapsulados y sin encapsular, y con áridos naturales. Para ello de describe la caracterización de los materiales empleados y la metodología seguida en los ensayos de durabilidad con respecto a permeabilidad, absorción, resistividad y carbonatación.

Como se ha mencionado, el objetivo fundamental del trabajo es evaluar la durabilidad de hormigón; mediante ensayos de durabilidad establecidos por la norma cubana. Paralelo a esto, comparar los resultados con datos de investigaciones anteriores, a fin de diagnosticar variaciones en el comportamiento de los hormigones, así como valorar la mejora o no de las diferentes propiedades con el paso del tiempo.

Para el cumplimiento de estos objetivos se emplean testigos de hormigones, elaborados en 2016 y 2017 expuestos durante 17 y 9 meses respectivamente. Los ensayos de durabilidad se realizan en el laboratorio de materiales de la Facultad de Construcciones, UCLV.

2.2. Materiales

Siendo este estudio, una evaluación de durabilidad de los hormigones elaborados en 2016 y 2017, se presentaran las dosificaciones realizadas para la fabricación de hormigones con los tres tipos de áridos (AN, AR, ARE). Así como los resultados de los ensayos realizados a estos hormigones en años pasados.

2.1.1. Dosificaciones logradas

Para el diseño experimental se emplea el método de Toufar, que permite diseñar mezclas con el contenido mínimo de huecos. Este método combina las tres fracciones del agregado que se utilizarán en la fabricación del hormigón y además requiere el análisis granulométrico de las tres fracciones de los áridos, los valores de peso específico y absorción de agua, los valores de peso volumétrico y el valor de la relación agua-cemento.(Rios Contreras 2017)

Tabla 2.1 Dosificaciones 2016/2017

2016						
Mezclas/ Material	Cemento (Kg)	Fracción Áridos			Agua (kg)	Aditivo (kg)
		Gruesa(kg)	Intermedia (kg)	Arena (kg)		
Patrón	336	812	444	591	151	1,1
Reciclado	384	402	425	628	173	0,7
2017						
Mezclas/ Material	Cemento (Kg)	Fracción Áridos			Agua (kg)	Aditivo (kg)
		Gruesa(kg)	Intermedia (kg)	Arena (kg)		
Reciclado	396	554	335	488	178	

Para la elaboración de ARE se utiliza la misma dosificación que para áridos reciclados, la única variación fue la encapsulación de la fracción 5-9 mm de los áridos.

Debido a que el diseño que se obtuvo con las características de los áridos reciclados del 2017 se logra un contenido de fino muy bajo en el hormigón, este no tiene una consistencia adecuada y se observa que los granos gruesos se separan de la mezcla, se decide entonces utilizar el diseño de mezcla del 2016.(Rios Contreras 2017)

2.3. Proceso de encapsulación de la fracción 5-9 mm

El procedimiento de encapsulación se realiza con una paletizadora en las instalaciones del Departamento de Ingeniería Mecánica en la UCLV. La fracción intermedia de los áridos (5-9 mm) se coloca en un mezclador de tambor inclinado giratorio y se rocía con agua hasta que estén húmedos superficialmente para facilitar la adhesión del cemento a los áridos. Seguidamente se comienza a regar el cemento y el agua hasta que el árido esté recubierto en su totalidad. Producto de este proceso los granos de los áridos reciclados salen recubiertos con una fina capa de cemento. Estos se extienden sobre unas mantas y tienen que ser cubiertas con toallas húmedas, el período de curado es de 7 días.

Luego de terminado el proceso de encapsulación, se determina que la mejor encapsulación es la realizada con cemento PP-35, para 60 kg/m3 por presentar mayores resultados de resistencia a compresión y una relación agua cemento de 0.38, siendo esta favorable debido a que a una menor relación a/c existe un menor número de poros en la mezcla que conforma la capa que cubre la fracción intermedia del árido.

Finalmente se encapsulan 85 kg, distribuidos en 31 encapsulaciones de 2.75 kg cada una.

2.4. Ensayos del hormigón endurecido

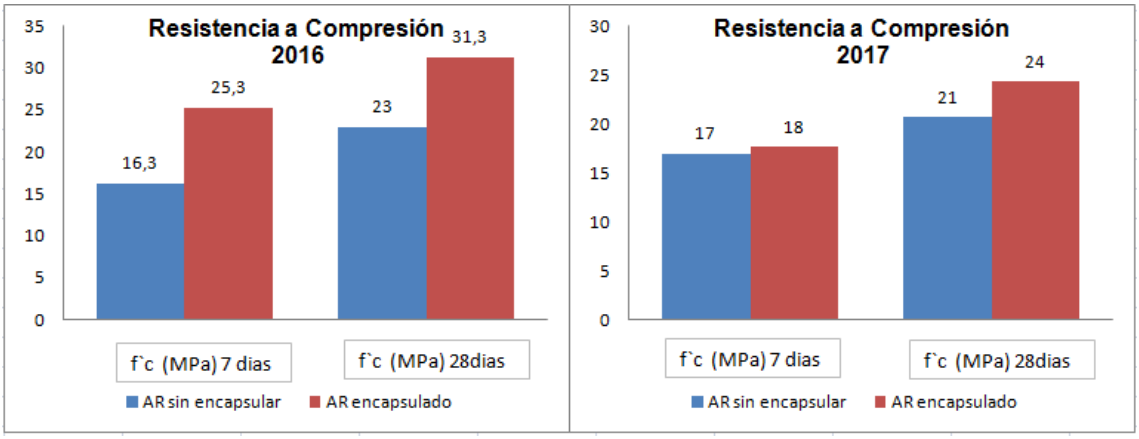


Fig. 2.1 Resistencia a compresión de hormigones en 2016 y 2017

La influencia de la encapsulación es significativa en el comportamiento de la resistencia a compresión de los hormigones tanto a los 7 días como a los 28

días, esta se incrementó respecto al hormigón producido en su totalidad con áridos reciclados sin encapsular.

2.5. Parámetros que determinan la durabilidad de los hormigones. Descripción de métodos y ensayos

La durabilidad del hormigón engloba su comportamiento y el de los elementos metálicos (armaduras) en su interior frente a las acciones mecánicas, físicas y químicas. Por tanto, no solo hay que considerar los efectos provocados por las cargas, sino también las condiciones ambientales a las que se expone. De esta forma al momento de crear un hormigón se analiza el tipo de ambiente donde se va a encontrar la estructura, ya que ambientes químicos agresivos pueden inducir corrosión.

Para garantizar protección frente a la corrosión es importante realizar un hormigón con una permeabilidad reducida, realizando una mezcla con una relación agua/cemento baja, una compactación idónea, un peso en cemento adecuado y la hidratación suficiente de éste añadiendo agua de curado para completarlo. De esta forma se consigue que haya la menor cantidad de poros y una red capilar interna poco comunicada y así se reducen los ataques al hormigón.

Los bloques de hormigón con áridos naturales y reciclados, se toman de los diferentes sitios de exposición. Los cuales son Punta Matamoros, en Cayo Santa María, en la provincia de Villa Clara, que se encuentra en la zona costera (agresividad muy alta); la Sede Universitaria en el Cayo Santa María, que se encuentra a 450m aproximadamente de la costa (agresividad alta); y en la Facultad de Construcciones de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, en la provincia de Villa Clara, que se encuentra a 50 km aproximadamente de la costa (agresividad baja). De acuerdo con la NC 120-2014, la agresividad en los sitios puede clasificarse en función de la cercanía al mar como se muestra en la tabla.

Tabla 2.2: Agresividad de medios

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.

Se realiza ensayos a los hormigones producidos en 2016 y 2017 en los diferentes sitios, expuestos durante 9 y 17 meses.

Para no alterar los resultados, se realizan primeramente los ensayos no destructivos, comenzando por la permeabilidad del aire, el cual se realiza in situ en los diferentes sitios de exposición. Luego se realiza la extracción de testigos para lo cual se utiliza la máquina extractora de testigos con sus aditamentos.(NC-318 2003) Las muestras se retractilan a fin de mantener las propiedades, pues los restantes ensayos no se realizan inmediatamente.

En el laboratorio de materiales de la facultad de construcciones se realiza el resto de los ensayos. Obtenidos los testigos se inicia el ensayo de resistividad eléctrica (no destructivo).Terminado este ensayo se realizan cortes a los testigos con los espesores especificados por las normas para posteriormente realizar los ensayos de carbonatación y porosidad; estos cortes se hacen con una cortadora de probetas de hormigón, la cual proporciona un corte uniforme.

Teniendo en cuenta el proceso de corte, para lograr los espesores necesarios para los diferentes ensayos a realizar, se añade a cada corte 5 milímetros por

encima de la especificación de la norma, teniendo en cuenta además el espesor del disco de la cortadora empleada. Realizados los cortes se retractilan nuevamente las muestras.

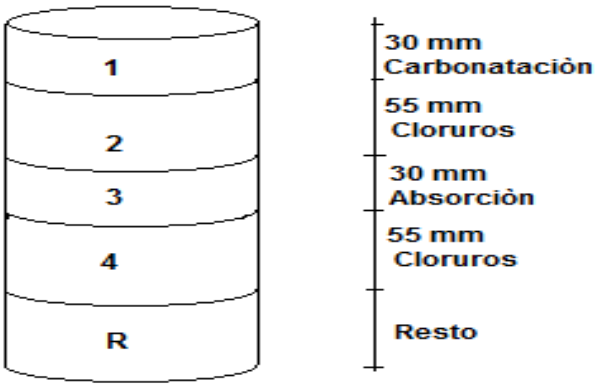


Fig. 2.2 Cortes realizados a los testigos.

2.5.1. Ensayo de Permeabilidad del aire

"No existe un método de aceptación general para caracterizar la estructura de poros del hormigón y relacionarla con su durabilidad. Sin embargo, diversas investigaciones han indicado que la permeabilidad del hormigón, al aire o al agua, es una excelente medida de su resistencia al ingreso de medios agresivos en el estado gaseoso o líquido y así constituye una medida de la durabilidad potencial de un hormigón dado.(Ebensperger and Torrent 2011)

El “Método Torrent” para medir, de modo enteramente no-destructivo, la permeabilidad al aire del recubrimiento apunta a especificar y controlar la calidad del recubrimiento de la estructura terminada. Fue creado en la década de 1990 y posteriormente incluido en las normativas suizas.

Este ensayo se aplica a hormigones elaborados con áridos naturales y reciclados, con el fin de evaluar la calidad de los mismos.

2.5.1.1. Justificación

Generalmente los criterios de control de hormigones endurecidos se basan en los resultados aplicados a probetas moldeadas y en establecer límites máximos en la relación agua/cemento. Dichos resultados no representan la calidad de la

capa superficial pues los elementos de hormigón para los ensayos se preparan y curan de forma distinta a las condiciones reales de las edificaciones. Por otra parte se hace difícil la verificación de la relación A/C, lo que hace que se cuestione como factor de durabilidad. Es por esto que la calidad real de esa capa vital es ignorada, lo que explica el desempeño insatisfactorio de las estructuras desde el punto de vista de la durabilidad.

Aunque el hormigón de mayor resistencia será, en la mayoría de los casos, más durable que el hormigón de menor resistencia, la resistencia a compresión no es una medida completa de la durabilidad, porque ésta depende, de las propiedades de las capas superficiales de un elemento de hormigón, las que ejercen sólo una influencia limitada sobre la resistencia a compresión.(Ebensperger and Torrent 2011)

Los ensayos sobre las probetas moldeadas son tratados de forma distinta a los elementos estructurales, es por esto que los resultados no llegan ser representativos de la calidad real del hormigón. Por tanto es más correcto medir directamente en la estructura y de ser posible in situ con los métodos no destructivos, o con testigos extraídos de ella.

2.5.1.2. Descripción del método

El método se realiza con el empleo del permeabilímetro de aire de doble cámara, con el cual se determina la permeabilidad intrínseca al aire del hormigón de recubrimiento (kT) para poder establecer una valoración de la calidad del recubrimiento.

El equipo consta de dos cámaras, una interna y otra externa con las que se crea una célula de vacío, además de un regulador de presión de membrana, que tiene como función equilibrar la presión en el interior de las cámaras.(Beushausen 2006) La función de la válvula 1 es restablecer el sistema para un nuevo ensayo ventilándolo con aire de la presión atmosférica.

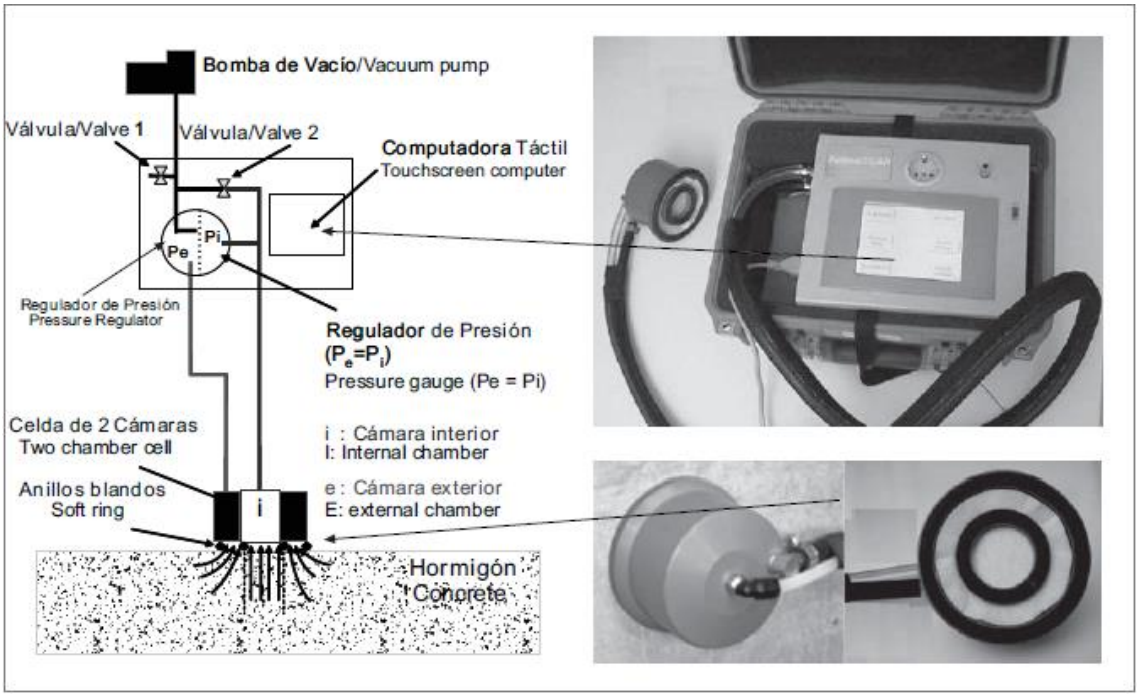


Fig. 2.3: Equipo de permeabilidad del aire TORRENT (Ebensperger and Torrent 2011)

Dado que en este método la geometría del problema está bien definida, mediante un modelo teórico es posible calcular el coeficiente de permeabilidad kT, con el cual se puede estimar la profundidad de hormigón afectada por el ensayo. (Este coeficiente es indicado por el equipo).

La permeabilidad al aire kT es muy sensible a la micro estructura del hormigón de recubrimiento, abarcando unos 6 órdenes de magnitud (0.001 a 10010-16 m2).En la tabla se muestra la clasificación de los valores de permeabilidad al aire del hormigón en función de kT.

Tabla 2.3: Clasificación de los valores de permeabilidad en función de kT.(Ebensperger and Torrent 2011)

Clase	$\boldsymbol{kT}$ $\boldsymbol{(10{-}16m2)}$	Permeabilidad
PK1	<0.01	Muy Baja
PK2	0.01-0.1	Baja
PK3	0.1-1.0	Moderada
PK4	1.0-10.0	Alta
PK5	>10	Muy Alta

Procedimiento

Para realizar el ensayo se requiere que la muestra presente una humedad superficial menor del 5%. Una vez comprobado esto se puede iniciar el trabajo con el equipo. Primeramente la célula se pone en la superficie concreta y se crea un vacío en ambas cámaras mediante la bomba. Luego de 1 minuto de crear vacío se cierra la llave 2, momento a partir del cual la bomba sólo puede actuar (cuando se lo permite el regulador) sobre la cámara externa, de manera que equilibra, la presión en ambas cámaras. Así, todo exceso de aire que ingrese lateralmente en la cámara externa será evacuado, logrando que el flujo de aire hacia la cámara central sea unidireccional y no se vea afectado por el ingreso de aire.

La evolución de la presión Pj. se mide con un sensor de presión comandado por un microprocesador que tiene integrado un cronómetro. El microprocesador almacena la información y efectúa los cálculos para mostrar automáticamente, al final del ensayo, el valor del coeficiente de permeabilidad al aire kT ($10^{-16}m^2$). El fin del ensayo acontece cuando la elevación de la presión en la cámara interna P, alcanza 20 mbar o, en el caso de hormigones muy impermeables cuando han transcurrido 12 minutos desde el comienzo del ensayo. Así, dependiendo de la permeabilidad del hormigón, el ensayo puede durar de 2 a 12 minutos.

2.5.1.3. Cálculo del coeficiente de permeabilidad

A medida que se va desarrollando el ensayo, se puede observar la evolución de la presión en la cámara interna, la cual se presenta mediante gráfico de la forma siguiente, para diferentes calidades de recubrimiento.

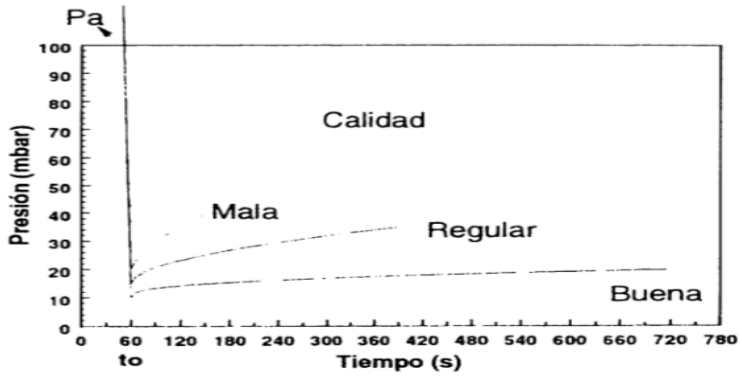


Fig. 2.4: Gráfico de evolución del ensayo

En una primera etapa (bombeo), entre 0 y 60 s, se aprecia una reducción de presión P, desde Pa hasta un valor menor de 50 mbar, esto termina al momento de cerrarse la llave 2.
La segunda etapa (llenado), a partir de t0, está marcada por el aumento de P, por la presencia del aire que entra en la cámara interna; este aumento será más rápido siempre que el recubrimiento ensayado sea más permeable. En el punto donde la presión llega a los 20 mbar, generalmente a los 12 minutos termina el ensayo.

Como el método está bien definido por un modelo teórico, es posible calcular el coeficiente de permeabilidad utilizando la siguiente formula.

$$kT = \left({}^{Vc}/_{A}\right)^2 * {}^{\mu}/_{2\varepsilon Pa} * \left(\frac{\ln\left(\frac{Pa+P}{Pa-P} * \frac{Pa-Po}{Pa+Po}\right)}{\sqrt{t}-\sqrt{to}}\right)^2$$

Donde:

- kT = coeficiente de permeabilidad al aire (m2)
- μ = viscosidad dinámica del aire (N.s/m2)
- Vc = capacidad de la cámara central más los elementos auxiliares en los que penetra el aire durante la etapa de llenado (m3)
- ε = porosidad vacía del hormigón (m3/m3)
- Ac = sección del 'cilindro' por el que el aire fluye dentro de la cámara central (m2)
- Pa = presión atmosférica (N/m2)
- t = tiempo (s)
- P = presión en la cámara central en el instante t (N/m2)
- Po = presión en la cámara central en el instante t0 = 60s (N/m2)

Una vez determinado kT, es posible estimar la profundidad del hormigón que fue afectada por el ensayo, utilizándola siguiente formula.

$$L = \sqrt{\frac{2 * kT * Pa}{\varepsilon\mu} * \sqrt{t}}$$

L es la distancia (m) desde la superficie de hormigón a la cual los poros se encuentran aún a la presión atmosférica original y su valor es también mostrado en la pantalla del microprocesador al final del ensayo.
Dada la sensibilidad que presenta la permeabilidad al aire (kT) este valor puede llegar a abarcar hasta 6 órdenes de magnitud (0,001 ~ 100 $\times 10^{-16}\ m2$).

2.5.2. Resistividad eléctrica

La medición de la resistividad superficial proporciona una información extremadamente útil acerca del estado de una estructura de hormigón. Se ha comprobado que está directamente enlazada con la probabilidad de corrosión y la velocidad de corrosión; y que existe una correlación directa entre la resistividad y la velocidad de difusión de cloruro.

Para determinar la resistividad eléctrica se aplica el procedimiento basado en el método de las cuatro puntas o Wenner, mediante el uso del Resipod. Este método se apoya en el empleo de cuatro electrodos en contacto con la superficie del material, separados a una distancia de 5 cm, mediante los cuales se aplica corriente y se mide la diferencia de potencia generada. El paso de la corriente se asegura por los iones presentes en el líquido en los poros.

Se aplica una corriente entre dos electrodos situados en los extremos del eje, y la medida de la diferencia de potencial en otros dos situados entre y alineados a los anteriores. Se toman cuatro mediciones separadas 90º entre si, en cada una de las probetas, logrando medir de forma espaciada. Luego se realiza un promedio de estas mediciones y se obtiene el valor de la resistencia eléctrica.

2.5.2.1. Justificación

Según estudios, la resistividad está directamente enlazada con la probabilidad de corrosión a causa de la difusión de cloruros y con la velocidad de corrosión una vez que ha ocurrido la despasivación del acero.

La resistividad del hormigón se incrementa cuando el hormigón se seca y cuando se carbonata, en particular, para los hormigones de cemento Portland. En

síntesis, la resistividad del hormigón es una función de la porosidad (o sea, también función del tiempo), la composición química (conductividad) de la solución de poros y el número y distribución de poros (conectividad, tortuosidad) como resultado de las proporciones de la mezcla y su interacción con el medio.(Torrens 2010)

En un hormigón saturado o parcialmente saturado ocurre una situación equivalente. El agua líquida presente en los poros se encuentra saturada en iones y entonces los parámetros de porosidad y el grado de saturación del hormigón son factores determinantes de su resistividad.

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.

Tabla 2.4: Estimación de probabilidad de corrosión. (Resipod-Family 2015)

Lectura	**Probabilidad**
≥ 100 kΩcm	riesgo de corrosión insignificante
= 50 a 100 kΩcm	bajo riesgo de corrosión
= 10 a 50 kΩcm	riesgo de corrosión moderado
≤ 10 kΩcm	alto riesgo de corrosión

Tabla 2.5 Estimación de velocidad de corrosión (Manual de operación RESIPOD FAMILY)

Lectura	**Velocidad**
> 20 kΩcm cm	Velocidad de corrosión baja
10 -20 kΩcm cm	Velocidad de corrosión baja a moderada
5-10 kΩcm cm	Velocidad de corrosión alta
< 5 kΩcm cm	Velocidad de corrosión muy alta

2.5.2.2. Descripción del método

Resipod es una sonda Wenner de 4 puntos completamente integrada, concebida para medir la resistividad eléctrica de hormigón en un ensayo completamente no destructivo. El equipo aplica una corriente a dos sondas exteriores y 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.

El equipo trabaja con 40 Hz de corriente alterna, generada a un máximo de 38 V. Se pueden encontrar dos modelos de Resipod, uno donde la distancia entre sondas es de 50 mm de acuerdo a la norma industrial y el otro con una separación de 38 mm, de acuerdo a las especificaciones de la AASHTO.

Los ensayos se realizaran con el modelo de distancia entre sondas de 50 mm

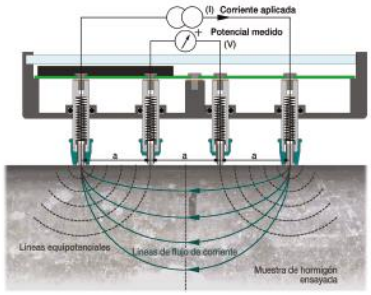


Fig. 2.5: Principio de funcionamiento del Resipod, para medición del resistividad eléctrica.(Resipod-Family 2015)

La resistividad se puede determinar una vez realizado en el ensayo y se define por la siguiente ecuación.

Resistividad $\rho = 2\pi aV/I$ (kΩcm)

Donde:

a: distancia entre sondas

v: potencial medido

I: corriente aplicada

2.5.2.3. Procedimiento

Para desarrollar el ensayo es necesario que las muestras de hormigón hayan sido expuestas durante un período de 48 horas en un ambiente de pH muy alto,

para esto se colocan en una solución de hidrato de cal, donde se obtiene un valor de pH aproximadamente de 12. Luego de este tiempo las muestras son retiradas y se procede a la medición.

Fig. 2.6: Test para determinación del pH

En este punto, la superficie del hormigón debe estar limpia y libre de cualquier material aislante de la corriente (sin revestimiento), además no pueden estar secas pues la corriente será conducida por los iones en el líquido de los poros.

Es necesario revisar las condiciones técnicas del equipo antes de realizar la medición, para esto será necesario limpiar adecuadamente los contactos y luego de esto comprobar el correcto funcionamiento. Esto se realiza con la cinta de prueba.

Fig. 2.7: Cinta de prueba RESIPOD

A fin de obtener una buena conexión entre el instrumento y la superficie del hormigón, se deben sumergir los contactos en un recipiente de poca profundidad para así lograr llenar los depósitos. Esto de realizar varias veces antes de realizar la medición.

El tamaño de las muestras debe asegurar el contacto de todas las sondas con la superficie, de lo contrario no se podrá obtener valor en la medición, al momento de la medición se debe comprobar que los pines no queden sobre poros o en partes secas de la muestra, asegurando de esta forma que los resultados no sean alterados.

No será posible realizar la medición si los valores son por debajo de <1 kΩcm, lo cual indica que la resistividad es extremadamente baja, tampoco será posible si el valor excede los 1000 kΩcm.

2.5.2.4. Factores que influyen

Contenido de humedad

La influencia del contenido de humedad sobre la resistividad ha sido descrita por una relacion lineal entre la conductividad electrica especìfica (inverso de la resistividad) y el contenido de agua.(Torrens 2010)

A medida que aumenta el contenido de humedad, se reduce la resistividad. Esto puedeser a causa de ls cambios en la relacion agua/cemento.

Temperatura

Al momento delensayo se deberá anotar elvalor de temperatura del hormigon. Se ha demostrado que un aumento de temperatura de un grado puede reducir la resistividad en un 3% para hormigónsaturado y un 5% para hormigón seco.(Resipod-Family 2015)

Tamaño de los áridos

De manera general, los áridos no conducen la corriente eléctrica, por lo que el uso del Resipod se recomienda para hormigones donde el tamaño máximo del árido sea menor que el espacio entre sondas.

Barras de acero en el hormigón

Por ser el acero, excelente conductor de la corriente, la presencia de refuerzo en el hormigón dificulta la medición pues puede alterar los resultados. En tanto que

sea posible, las barras de armadura no deberán encontrarse directamente debajo de la sonda, y no deberán estar en posición paralela a estas. La orientación de medición recomendada es determinada por la distancia entre las barras en comparación con la distancia entre sondas.

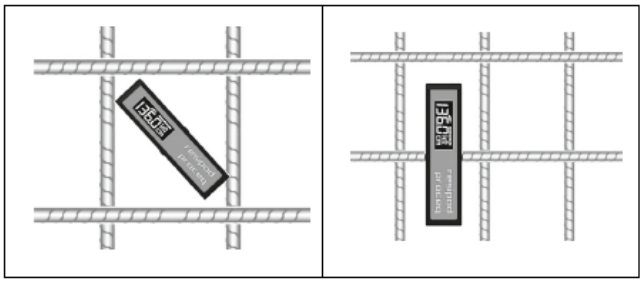


Fig. 2.8: Orientacion optima del equipo para medicion con presencia de barras de refuerzo.(Resipod-Family 2015)

Carbonatación

El hormigón carbonatado presenta una resistividad más alta que los hormigones no carbonatados, siempre que la profundidad de carbonatación sea menor que la distancia entre sondas, el efecto será mínimo. Para capas carbonatadas de espesor considerable será necesario aumentar la distancia entre sondas para mejores resultados.

2.5.3. Carbonatación

La carbonatación de hormigón surge cuando el dióxido de carbono (CO2) en el aire penetra en el concreto, reacciona con el hidróxido de calcio (CaOH2) en la pasta de cemento produciendo carbonato de calcio (CaCO3). Esto conlleva a una reducción del pH de la pasta de un valor normal alrededor de 13 a valores inferiores a 9, iniciando así el proceso de corrosión del acero.

Existen varias técnicas para determinar la carbonatación, entre estos, el empleo de indicador de pH con fenolftaleína, el análisis Termogravimétrico (TGA) y el Análisis Térmico Diferencial (DTA), cuyo uso conjunto permite analizar cualitativa y cuantitativamente las descomposiciones del carbonato cálcico y de la portlandita. Asimismo, la difracción de rayos X (XRD), la espectroscopia de Infrarrojo, la medida del pH, el análisis químico, la microscopía electrónica de

barrido (SEM) y la cromatografía de gases son usadas por algunos autores para evaluar diferentes aspectos del fenómeno de la carbonatación.(García, Perdrix et al. 2011)

El ensayo de profundidad de carbonatación se realiza según lo establecido en la NC 355-2004, en el primer corte de 30 mm en cada uno de los testigos.

2.5.3.1. Justificación

Los procesos de carbonatación natural (exposición al medio) son generalmente muy lentos a causa del bajo contenido en CO2 de la atmósfera, del orden de 0,04% en volumen, de forma que en determinados hormigones muy densos los efectos de este fenómeno pueden no aparecer hasta pasados varios años o decenios desde su puesta en servicio. La lentitud del proceso ha llevado a algunos investigadores a realizar estudios acelerados utilizando porcentajes de CO2 mayores que el atmosférico para intentar predecir su comportamiento a largo plazo.(García, Perdrix et al. 2011)

Para este método acelerado no existen datos exactos del porcentaje de CO2 aplicar en ensayos de la durabilidad de hormigón, variando estos en las diferentes bibliografías, quedando estos en un rango de 1% a 100%. El método natural, por otra parte, refleja directamente la profundidad de carbonatación real alcanzada en el período de tiempo de exposición, bajo condiciones ambientales reales.

2.5.3.2. Descripción del método

El indicador a utilizar es una disolución de fenolftaleína al 1% y alcohol etílico al 70%. Para 100 cm^3, se disuelve 1 g de fenolftaleína en 70 cm^3 de alcohol etílico del 99 % de pureza y se adicionan después 30 cm^3de agua destilada.(NC-355 2004)

El indicador, al contacto con hormigón, se torna de color purpura para valores de pH superiores a 9.5 (pH de hormigones no carbonatados) e incolora en valores

inferiores a 8 (hormigón carbonatado). Para valores entre 8 y 9.5 toma colores entre rosa y rojo-púrpura.

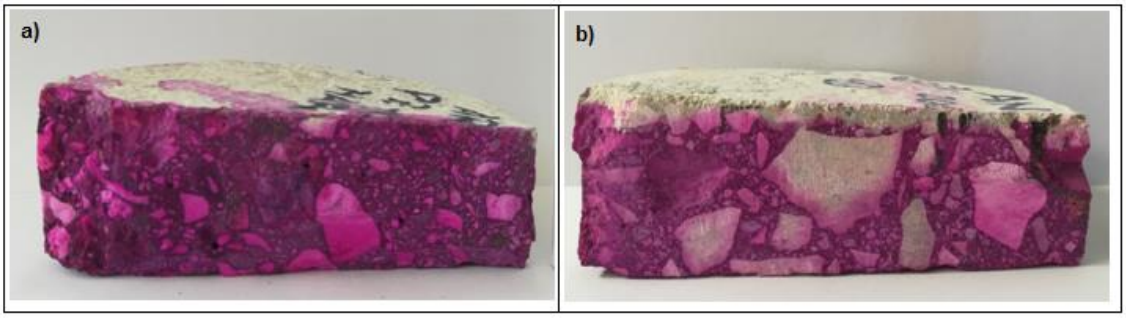


Fig. 2.9: Ensayo para determinar profundidad de carbonatación mediante indicador de fenolftaleína. a) Hormigón no carbonatado b) hormigón carbonatado.

2.5.3.3. Procedimiento

El ensayo se realiza con muestras de 30 mm de espesor, medidos desde la cara superior del testigo (superficie que estuvo expuesta al medio), las cuales son cortadas (en seco) por la mitad, para observar el avance de carbonatación desde la parte superior.

De acuerdo a lo estipulado por la norma, al inicio del ensayo será necesario que las muestras se encuentren secas. Se aplica la disolución de fenolftaleína con pulverizador u otro medio que asegure la aplicación uniforme en la superficie del hormigón.

Luego de la aplicación, pasados uno o dos minutos, se procede a la medición de la profundidad de carbonatación (zona incolora), la cual se efectúa con un instrumento de precisión de 0,5 mm. La medición no deberá realizarse después de 15 min de aplicado el indicador.

Se toman varias mediciones a cada muestra, obteniendo valores máximos y mínimos, en caso que la carbonatación aparezca de forma irregular. El valor de la profundidad de carbonatación es el promedio de estos valores. Se debe evitar medir en zonas donde los áridos tengan gran tamaño y en las esquinas de las muestras, zonas donde la exposición a la atmosfera ha sido por más de una cara.

2.5.4. Absorción por capilaridad

La capilaridad es una propiedad de los líquidos que depende de la tensión superficial, y le confiere la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar, que en el caso del hormigón son los poros. El liquido asciende cuando la fuerza intermolecular entre partículas es menor que la adhesión del líquidos con el material, y deja de ascender una vez que la tensión superficial es equilibrada por el peso del liquido que llena los poros.

El ensayo se realiza de acuerdo a (NC-345 2011)Determinación de la absorción de agua por capilaridad. Para esto se emplea el corte número tres de 25 mm, de los testigos de hormigón.

2.5.4.1. Justificación

La porosidad del hormigón influye de manera directa en las propiedades mecánicas y en la durabilidad del mismo. La porosidad relativa o poros interconectados, se ejecuta calculando el volumen de vacíos en una muestra en relación a su volumen total.

2.5.4.2. Descripción del método

Las muestras de 25 mm de espesor, obtenidas de los cortes a los testigos de hormigón son sometidas a un proceso de sacado hasta que presenten peso constante, luego de esto serán colocadas en recipientes estancos con agua, por periodo de tiempo de 96 horas o más hasta que las muestras se saturen completamente. Durante este tiempo se realizan mediciones del incremento del peso. El ensayo se realiza a temperatura ambiente de 25ºC ± 2 ºC y humedad relativa de 65% ± 5%.

2.5.4.3. Procedimiento

La NC 345:2011, establece muestras de 25 mm de espesor con sus caras paralelas y humedad constante, como requisito para el ensayo. El espesor se obtuvo al momento del corte, se empleó la tercera sección de las probetas cilíndricas para este ensayo. Luego de cortadas las muestras fueron retractiladas para evitar el cambio en las propiedades, ya que el ensayo no se realizo en ese

día. Se procede a rebajar y pulir las muestras con el objetivo de limar asperezas producidas por la sierra, que pudieran afectar la simetría de las mismas. Para obtener el equilibrio de humedad, las láminas se someten a un secado en estufa a 60ºC, por período mínimo de 48 horas, según la norma; para lograr este equilibrio fue necesario que permanecieran un total de 216 horas (9días). Luego de terminado este proceso se recubren las áreas laterales con parafina, para evitar que una vez colocadas en agua, el líquido penetre por esta zona. Las muestras se someten a medición del diámetro y espesor, valores con los que se realizan los cálculos se resistencia a la penetración del agua, coeficiente de absorción capilar y porosidad efectiva.

Las muestras ya preparadas, se colocan sobre listones de madera dentro de un recipiente estanco. La altura del agua, por encima de los listones debe ser de 5 mm aproximadamente, para mantener este nivel se colocará una probeta con agua invertida a 5 mm, de forma tal que quede dentro del agua; para esto se empleó un pomo a falta de la probeta.

Fig. 2.10: Ensayo absorción de agua por capilaridad

Las probetas se pesan antes de colocarse en el agua, y posteriormente se pesan a las edades de (1/12; 1/6; ¼; ½; 1; 2; 3; 4; 6; 24; 48; 72; 96) horas contar a partir del momento que se inicia el ensayo, se pesan cada 24 horas y a partir de las 96 horas hasta que se estabilice el peso de las mismas. Se deben secar superficialmente las muestras antes de cada pesado, para eliminar el excedente de agua.

Terminado el proceso de pesado, con los resultados obtenidos se grafica el peso en kg. Contra la raíz cuadrada del tiempo. El estado 1 corresponde al llenado de agua de todos los poros de gel inicialmente vacíos y los otros poros capilares, mientras que el estado 2 corresponde al llenado gradual de los poros inertes o vacíos de aire por un proceso de disolución difusión de aire. Solo interesa el estado 1, pues el estado 2 es de interés en la relación a la resistencia a la congelación.

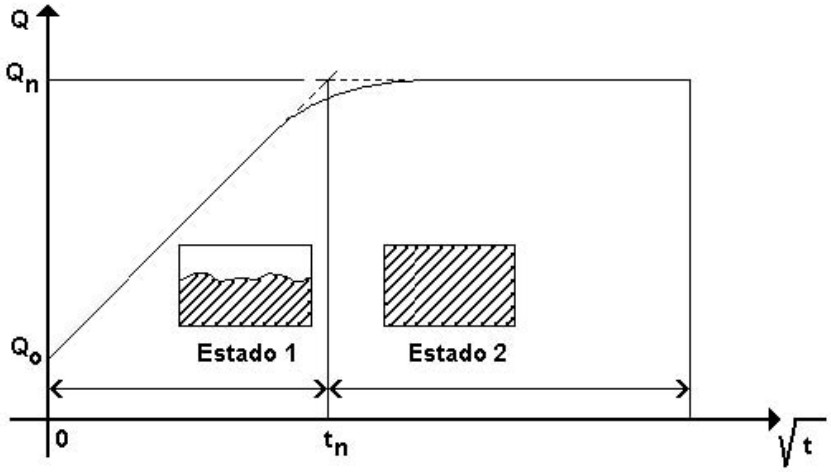


Fig. 2.10: Curva típica de absorción de agua por capilaridad.(NC-345 2011)

2.5.4.4. Cálculo de resultados

Tabla 2.6 Ecuaciones para determinación de resultados

Resistencia a la penetración del agua	**Coeficiente de absorción capilar**	**Porosidad efectiva**
$m = \frac{t_n}{h^2}$ (s/m²)	$k = \frac{Q_n - Q_0}{\sqrt{t_n}} \times \frac{1}{A}$	$\xi = \frac{Q_n - Q_0}{A \times h \times 1000}$ (%)
tn: tiempo en el punto crítico (obtenido del gráfico) (s). h: altura o espesor total del espécimen (m).	Q_0: peso del espécimen al inicio (kg) Qn: peso del espécimen en el punto crítico (kg) tn: tiempo en el punto crítico (obtenido del gráfico) (s) A: área de succión del espécimen (m2) h:altura o espesor total del espécimen (m2)	

Tabla 2.7: Valores límites de porosidad efectiva (NC 120 2014)

Agresividad	Máxima porosidad efectiva (%)
Muy alta	10
Alta	10
Media	15
Baja	15

2.6. Conclusiones parciales

- Se realizan los ensayos de permeabilidad del aire, resistividad eléctrica, carbonatación y absorción del agua por capilaridad, de acuerdo a lo establecido por las normas correspondientes a cada uno de ellos. Se realizan en orden, comenzando por los ensayos no destructivos para no alterar los resultados.
- Para los ensayos se respetaron las normas de seguridad y se tuvo en cuenta la preparación adecuada de cada una de las muestras para cada ensayo.
- Se aplican los ensayos a las probetas de hormigones con áridos naturales, con áridos reciclados y con áridos reciclados encapsulados, de los sitios de exposición seleccionados.

Capítulo III Análisis de resultados.

3.1. Introducción

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos de los ensayos realizados a los testigos extraídos de los bloques de hormigón colocados en los tres sitios de exposición, por período de tiempo de 17 y 9 meses. Se establece una comparación entre los hormigones con áridos naturales, áridos reciclados y áridos reciclados con la fracción 5-9 mm encapsulados.

Con el propósito de evaluar la durabilidad de las muestras con el paso del tiempo y determinar las mejoras o no de las propiedades de los hormigones expuestos, se comparan los resultados obtenidos en 2017 con los obtenidos en esta investigación.

3.2. Ensayo permeabilidad del aire

3.2.1. Control de humedad superficial

Para realizar el ensayo de permeabilidad, fue necesario chequear que la humedad de los bloques de hormigón estuviera por debajo de 5%.

Tabla 3.1 Chequeo de humedad relativa de los elementos de hormigón.

Sitio de exposición	Tipo de hormigón	Humedad			Humedad Media%	Temperatura (ºC)
		1	2	3		
Punta Matamoros	AN	4,2	4,3	4,5	4,3	27
	AR 2017	4,7	4,8	5,1	4,9	28
	ARE 2016	3,2	4,0	4,3	3,8	28
	ARE 2017	4,1	4,1	3,9	4,0	29
Sede Universitaria	AN	3,0	3,4	3,7	3,4	26
	AR 2017	3,8	3,5	3,7	3,4	25
	ARE 2016	3,5	3,9	3,4	3,6	26
	ARE 2017	3,1	3,4	3,8	3,4	25
Facultad Construcciones	AN	3,8	4,1	4,0	4,0	30
	AR 2017	4,4	4,1	4,0	4,2	30
	ARE 2016	4,4	4,1	4,0	4,2	30
	ARE 2017	4,2	4,3	4,4	4,3	29

3.2.2. Análisis de resultados del ensayo de Permeabilidad del aire

Terminado el ensayo de permeabilidad del aire, realizado según el procedimiento descrito en el capítulo anterior, se obtienen los siguientes resultados. Para el análisis de estos datos se tiene en cuenta la tabla 2.3, para la clasificación del hormigón en función de kT.

Tabla 3.2 Resultados de permeabilidad al aire en elementos colocados en sitios de exposición.

Sitio de exposición	Árido	kT(m^2 x10^{-16})	L (mm)	Permeabilidad
Punta Matamoros	AN	0,081	20	Baja
	AR	0,350	34	Moderada
	ARE 2016	0,046	15	Baja
	ARE 2017	0,270	33	Moderada
Sede Universitaria	AN	0,120	25	Moderada
	AR	1,600	49	Alta
	ARE 2016	0,360	34	Moderada
	ARE 2017	0,490	37	Moderada
Facultad de Construcciones	AN	0,100	22	Baja
	AR	0,110	24	Moderada
	ARE 2016	0,110	24	Moderada
	ARE 2017	0,160	28	Moderada

Las siguientes figuras 3.1 y 3.2 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de Permeabilidad del aire en cuanto a longitud de penetración y kT.

En todos los casos de exposición el valor de kT, obtenido para AN es menor en comparación con los AR y ARE, presentando una permeabilidad baja. Para el resto de las muestras se obtiene permeabilidad moderada, con valores cercanos entre sí. Esto se debe a la alta porosidad que presenta el hormigón a causa del árido reciclado.

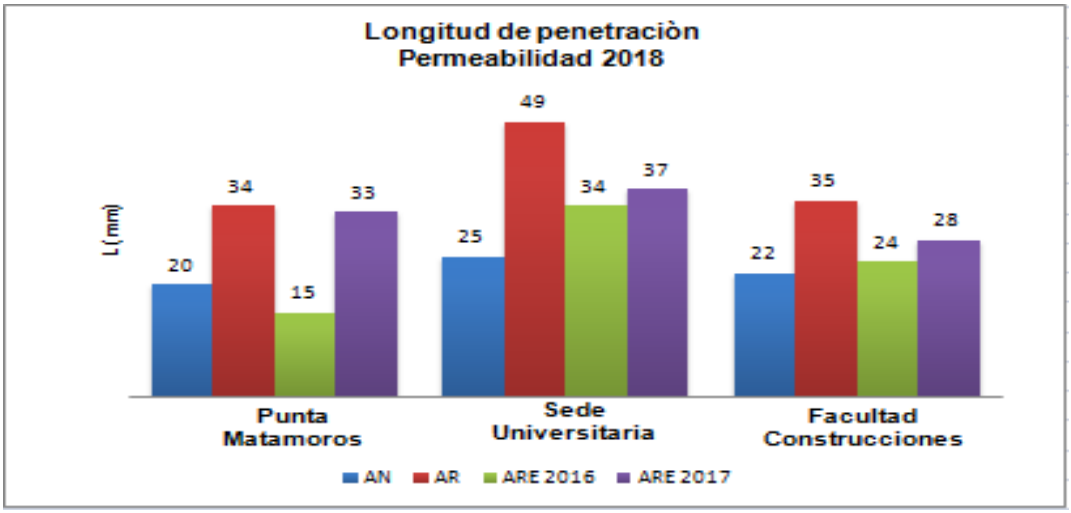


Fig. 3.1. Resultados de Longitud de penetración. Ensayo permeabilidad del aire

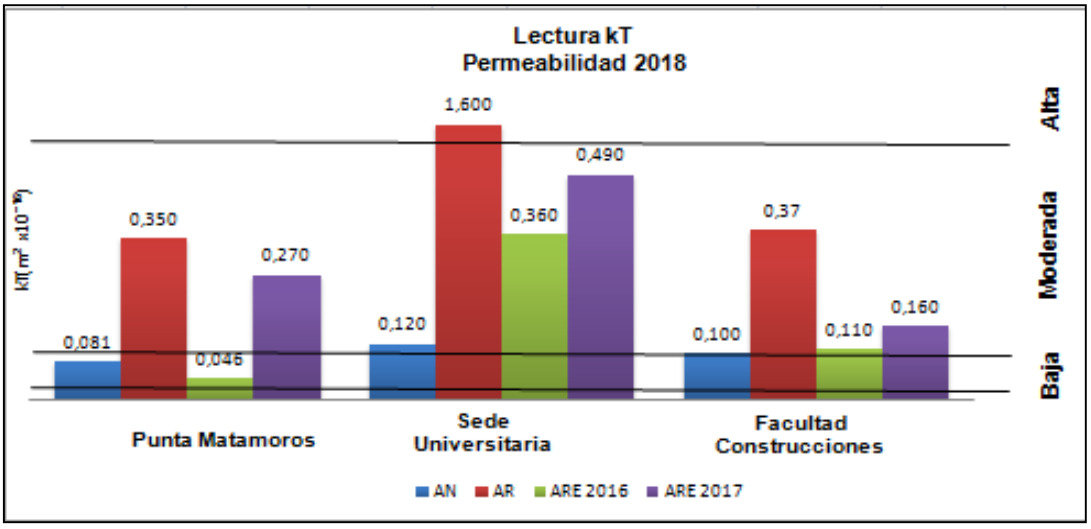


Fig. 3.2. Resultados de kT. Ensayo permeabilidad del aire

La diferencia entre AR y ARE, se hace notar, resultando la mezcla de 100% AR más permeable que la elaborada con los áridos sometidos al proceso de encapsulación. Como se explica en el capítulo I, la encapsulación de los áridos busca la mejora de las propiedades del hormigón, siendo una de estas la reducción de la porosidad.

Los resultados obtenidos de las muestras expuestas en Punta Matamoros son menores en comparación con los obtenidos en la Sede y en la facultad. Esto pude ser debido a la cristalización.

La cristalización del hormigón puede ser un proceso natural o ser lograda con el uso de aditivos cristalizantes. Surge cuando el agua contenida en las microfisuras y poros capilares, reacciona con el aluminio y los iones de calcio (presentes en la mezcla de hormigón) para formar cristales indisolubles que crecen dentro del sistema capilar, siempre que haya humedad en la estructura. Con este proceso el hormigón se densifica, de tal forma que el agua y los elementos dañinos (cloruros y sales) no pueden penetrar.

El valor obtenido en Sede Universitaria para AR, no corresponde con los demás valores de esta mezcla, pudiendo ser un error en la medición por tener la probeta (a la que se le realizó el ensayo) una superficie muy rugosa. Esto puede crear un deficiente sellado de la cámara externa, dificultando el correcto funcionamiento del equipo, basado en mantener la misma presión en ambas cámaras del permeabilímetro, y por tanto falsear los resultados. No teniendo medición de otras muestras, y teniendo en cuenta que el año anterior no se contaba con esta mezcla, por lo que tampoco hay un valor para establecer comparación, se decide excluir este valor del análisis y tomar el desempeño de la mezcla de 100% AR solo por los resultados en los otros sitios de exposición.

A pesar de ser menos poroso el AN, el uso de ARE para la elaboración de hormigones es viable, teniendo en cuenta que los resultados de este ensayo son semejantes.

3.2.3. Comparación con resultados de 2017

Tabla 3.3 Resultados de permeabilidad del aire 2017 y 2018

Sitios de exposición	**Tipo de árido**	**Año**		**Permeabilidad**
		2017	**2018**	
Punta Matamoros	**ARE**	0,13	0,05	Moderada
	AN	0,04	0,08	Baja
Sede Universitaria	**ARE**	0,15	0,36	Moderada
	AN	0,10	0,12	Moderada
Facultad Construcciones	**ARE**	0,14	0,11	Moderada
	AN	0,11	0,10	Moderada

La diferencia entre los valores de ambos años es despreciable, y las muestras permanecen en los mismos intervalos de permeabilidad. De forma general, los valores de kT, se encuentran entre 0,1 y 1, siendo la permeabilidad moderada.

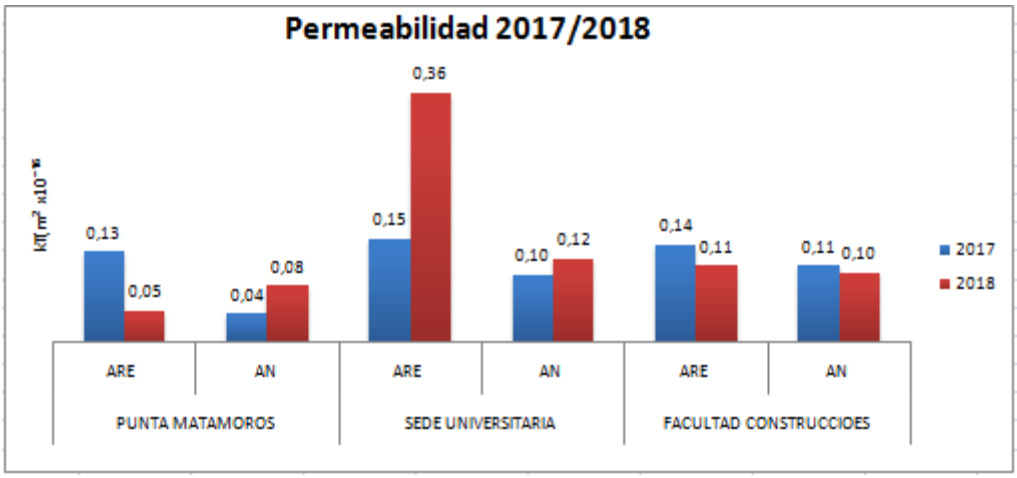


Fig. 3.3 Resultados de kT 2017 y 2018

3.3. Ensayo de Resistividad eléctrica

3.3.1. Obtención de valores

Las muestras se colocan durante 48 horas en solución de hidrato de cal y agua, para lograr un pH alto. Al momento de las mediciones se chequea la temperatura, ya que las referencias son de 20ºC.

Ver Anexo 1 Tabla 3.4. Valores del ensayo de Resistividad Eléctrica.

3.3.2. Corrección de valores

Un aumento de la temperatura de un grado puede reducir la resistividad en un 3% para hormigón saturado. Por lo que se calcula según la fórmula siguiente los valores reales de resistividad.

Rr= Rm/ [1− (0.03∗ (T−20))]

Donde:

Rr: valor de resistencia real

Rm: Valor de resistencia medido

T: Valor de temperatura

Ver Anexo 2. Tabla 3.5: Valores corregidos del ensayo Resistividad Eléctrica.

3.3.3. Análisis de resultados

Según las tablas 2.4 Probabilidad de corrosión y 2.5 Velocidad de corrosión, se realiza la clasificación de las muestras. En la siguiente tabla se resumen los valores obtenidos y la calificación.

Tabla 3.6: Clasificación de los valores obtenidos en el ensayo Resistividad Eléctrica.

Sitio de exposición	**Tipo Árido**	**Resistividad Media (kΩ)**	**Probabilidad corrosión**	**Velocidad corrosión**
Punta Matamoros	AN	37,6	Moderada	Baja
	AR	6,9	Alta	Alta
	ARE 2016	11,9	Moderada	Baja a Moderada
	ARE 2017	9,9	Alta	Alta
Sede Universitaria	AN	33,6	Moderada	Baja
	AR	7,0	Alta	Alta
	ARE 2016	10,9	Moderada	Baja a Moderada
	ARE 2017	7,5	Alta	Alta
Facultad Construcciones	AN	36,7	Moderada	Baja
	AR	8,4	Alta	Alta
	ARE 2016	11,4	Moderada	Baja a Moderada
	ARE 2017	8,9	Alta	Alta

Para el caso de las muestras elaboradas con AN, la probabilidad de corrosión es moderada, con una velocidad baja, mientras que los hormigones con 100% AR y ARE 2017, presentan probabilidad y velocidad de corrosión alta, los hormigones con ARE 2016 tienen probabilidad moderada y velocidad de

corrosión de baja a moderada. Esto sucede de la misma forma en los tres sitios de exposición.

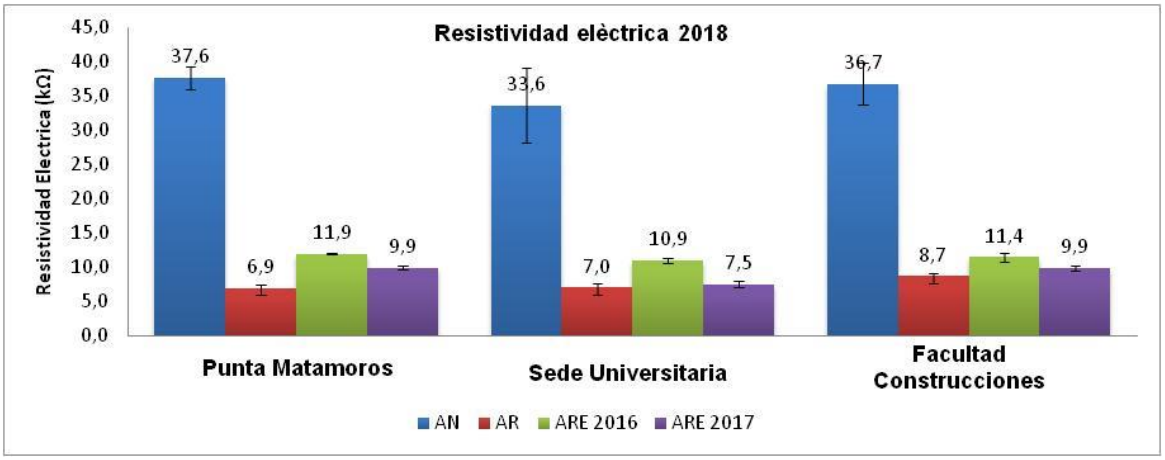


Fig. 3.4 Resultados del ensayo Resistividad eléctrica.

Es notable la diferencia entre los valores de AN y AR, esto debido a que la porosidad es menor para los hormigones convencionales y mayor para los hormigones reciclados producto del propio árido. Por otra parte, la encapsulación de la fracción 5-9 mm de los áridos reciclados empleados para la mezcla de 2016, aporta mejoras; al recubrir los áridos con la pasta de cemento, se cubren los poros, esto resulta en una disminución de la porosidad, notándose un aumento del 50 % o más en los valores de resistividad de estas muestras con respecto a las realizadas con 100% AR.

Los valores de ARE 2016 siguen quedando por debajo de los obtenidos para los AN, esto sucede porque solo fue tratada la fracción intermedia de los áridos reciclados, mejorando solo las propiedades de estos, quedando por otra parte la fracción gruesa y los finos los cuales mantienen la elevada porosidad propia de los áridos reciclados.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en Resistividad eléctrica, se concluye que se pueden utilizar los AR para la elaboración de elementos estructurales no armados, para cualquier sitio de exposición, para evitar la corrosión de las armaduras. El uso de AR para elementos que requieran acero de refuerzo, reduciría las propiedades resistentes del mismo además de ser un fuerte factor parra la corrosión, por lo que se recomienda para estos elementos el uso de AN.

3.3.4. Comparación con resultados de 2017

Tabla 3.7. Resultados Resistividad eléctrica 2017/2018

Sitio Exposición	Tipo de árido	Año	
		2017	2018
Punta matamoros	AN	29,3	37,6
	ARE	10,9	11,9
Sede universitaria	AN	31,1	33,6
	ARE	-------	10,9
Facultad construcciones	AN	30,3	36,7
	ARE	11,2	11,4

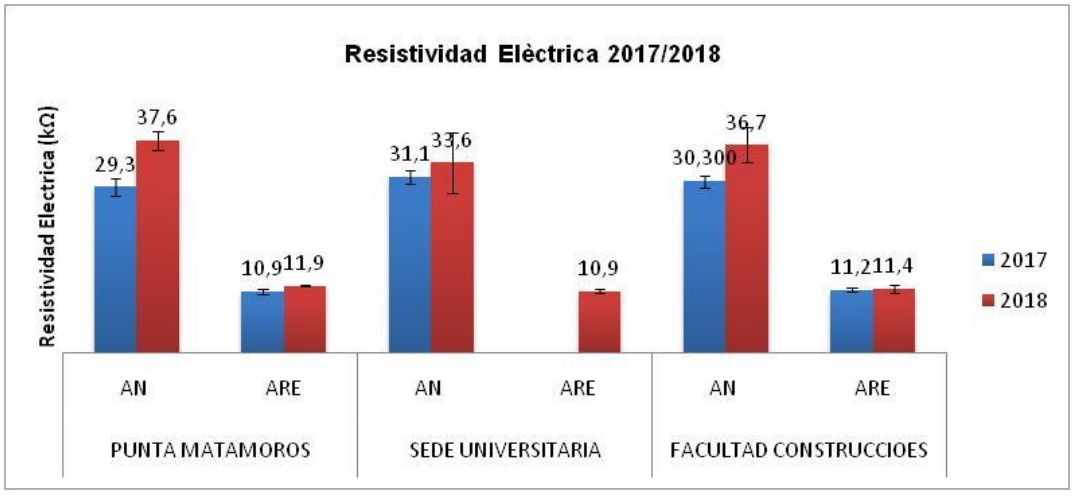


Fig. 3.5. Resultados Resistividad eléctrica 2017/2018

Se puede apreciar que los resultados de 2018 no muestran grandes variaciones con respecto a los obtenidos en 2017. Los resultados de AN y ARE mantienen probabilidad de corrosión moderada. Con el paso del tiempo el hormigón se densifica en su conjunto, poco a poco disminuye su volumen de porosidad capilar (Sánchez de Juan 2004), por lo que los valores de resistividad mejoran con respecto a las propiedades iniciales. Es por esto que se esperan mejores resultados a medida que los hormigones adquieran mayores edades.

3.4. Ensayo de Carbonatación

El ensayo de realiza al instante de preparar la solución de fenolftaleína, se aplica a la muestra con el uso de un pulverizador, y seguidamente esta se torna de color rosa fuerte o purpura para las zonas no carbonatadas del hormigón, las áreas que permanezcan sin coloración serán entonces las carbonatadas.

3.4.1. Obtención de valores

Los resultados obtenidos luego realizado el ensayo por el procedimiento descrito en (NC-355 2004), se encuentran en la tabla 3.8 Resultados del ensayo Carbonatación. Anexo 3

Las mediciones de profundidad de carbonatación fueron realizadas con el Pie de rey, el cual presenta un error de 0,02 mm.

Los testigos de AR, extraídos de Punta Matamoros no presentaron carbonatación a simple vista, esto también sucede casi en la totalidad de las muestras de AR tomadas de la Facultad de Construcciones.

3.4.2. Análisis de resultados

Las muestras de hormigón fueron colocadas en tres sitios de exposición, donde las condiciones ambientales son diferentes. Las expuestas en la Sede Cayo Santa María, cuentan con las condiciones propicias para la carbonatación. Este lugar presenta un índice de humedad relativa entre el 40 y 90%, favoreciendo el proceso, pues con la presencia del agua se hace posible la disolución del hidróxido de calcio de la mezcla, y la formación del carbonato de calcio. Otro factor influyente son las altas temperaturas, ya que con el aumento de esta las moléculas de agua se hacen más activas y reaccionan con más rapidez a los elementos en contacto.(Rick 2000, Vidaud 2012).

Por otra parte, en Punta Matamoros la humedad es demasiado alta, los testigos se encuentran totalmente saturados, no dejando lugar en los poros a la penetración de CO2; en un poro saturado el agua está adherida eléctricamente a las paredes y el gas no es capaz de vencer esa fuerza por lo que no penetrará.(Vidaud 2012).

Los bloques de hormigón expuestos en la Facultad de Construcciones cuentan con variaciones en humedad relativa, no siempre existiendo suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelvan cantidades significativas de hidróxido de calcio.

Por tanto, al comenzar el ensayo se estima que las muestras de la Sede presenten mayor profundidad de carbonatación que las muestras de los otros dos sitios; además que en AN sea menor que en AR, por tener estos últimos, mayor porosidad y ser una fuente de propagación de carbonatación, por no impedir el paso del CO_2.

Tabla 3.9 Resultados del ensayo Carbonatación

Sitio Exposición	Tipo Árido	Prof. Carbonatación
Punta Matamoros	AN	0,9
	AR	0
	ARE 2016	0
	ARE 2017	0
Sede Universitaria	AN	3
	AR	4
	ARE 2016	0,5
	ARE 2017	1,3
Facultad Construcciones	AN	1,9
	AR	0,3
	ARE 2016	0
	ARE 2017	0,3

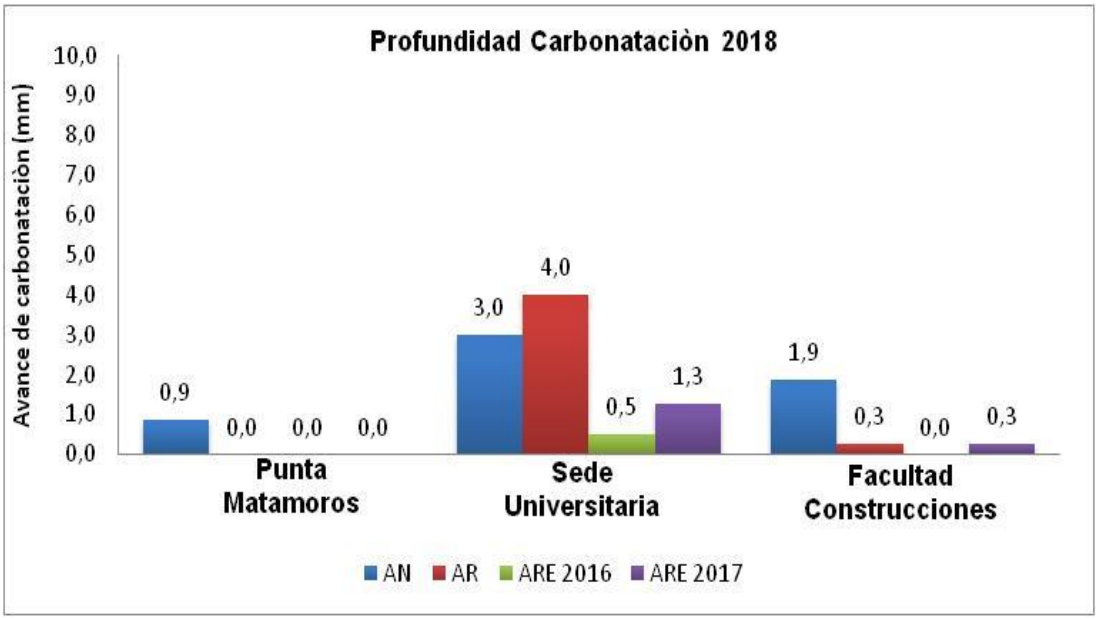


Fig. 3.6 Profundidad de carbonatación

El avance de carbonatación en los tres sitios de exposición es bajo en testigos de hormigón elaborados con AN y AR de forma general.
Como se esperaba, los mayores valores se obtienen de las muestras expuestas en la Sede Universitaria, donde existe un intervalo de humedad que facilita el proceso.

El comportamiento de los AR corresponde a la porosidad propia de estos hormigones, lo cual es un factor que propicia la penetración de CO2, y facilita la carbonatación. No obstante para ARE los valores son más favorables.

Del análisis de este ensayo se resume que es recomendable el uso de ARE para la fabricación de hormigones.

3.4.3. Comparación con resultados de 2017

Los procesos de carbonatación natural son lentos a causa del bajo contenido en CO2 de la atmósfera(García, Perdrix et al. 2011), no obstante se aprecia un aumento del 50% o más, en la profundidad de carbonatación, en las muestras de AN de Punta Matamoros y la Sede Universitaria; este cambio se produce entre la primera medición a los 5 meses y la segunda a los 17 meses de expuestos. Los valores para los hormigones expuestos en la facultad mantienen valores constantes.
El comportamiento de los testigos de ARE es mejor, teniendo en cuenta que solo presentan carbonatación aquellas muestras que fueron expuestas en la Sede Universitaria, donde existen condiciones propicias para ese proceso.

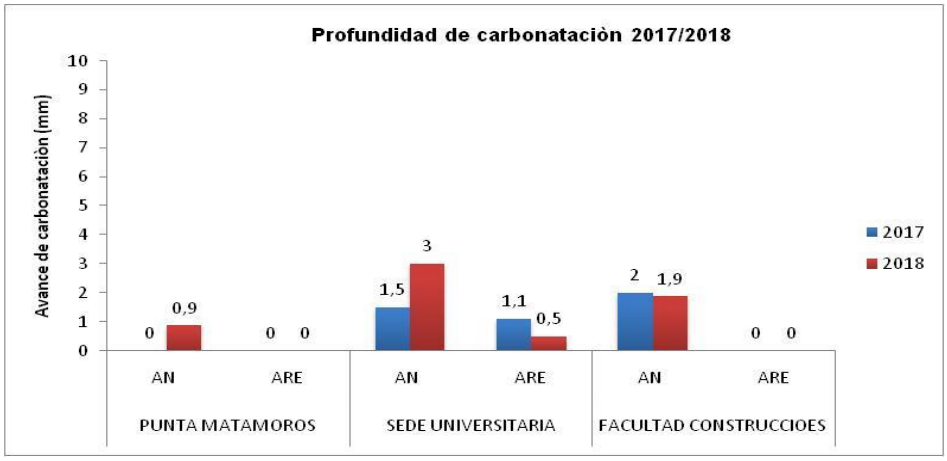


Fig. 3.7 Profundidad de carbonatación 2017/2018

De acuerdo con este ensayo es viable el uso de áridos reciclados encapsulados, ya que las muestras presentan bajos valores de carbonatación.

3.5. Ensayo Absorción por Capilaridad

3.5.1. Chequeo de absorción

Para el ensayo es necesario el control de la temperatura, que durante todo el tiempo se mantuvo entre los 24,3ºC y 26,4ºC, mientras que la humedad osciló entre 61% y 66%. Estos valores se corresponden con el intervalo establecido en (NC-345 2011)

Se chequea la velocidad de absorción durante 120 horas, período de tiempo en que las muestras alcanzaron peso constante. Los resultados obtenidos se encuentran en la

Tabla 3.10 Velocidad de absorción. Anexo 4

3.5.2. Cálculo de t_n y Q_n

Se realiza un gráfico de velocidad de absorción contra la raíz cuadrada del tiempo para cada una de las muestras. Se crea una línea de tendencia para cada curva y se escriben las ecuaciones correspondientes a cada línea de tendencia. Estas ecuaciones se igualan y se determina el punto donde el tiempo se hace crítico (t_n).(NC-345 2011)

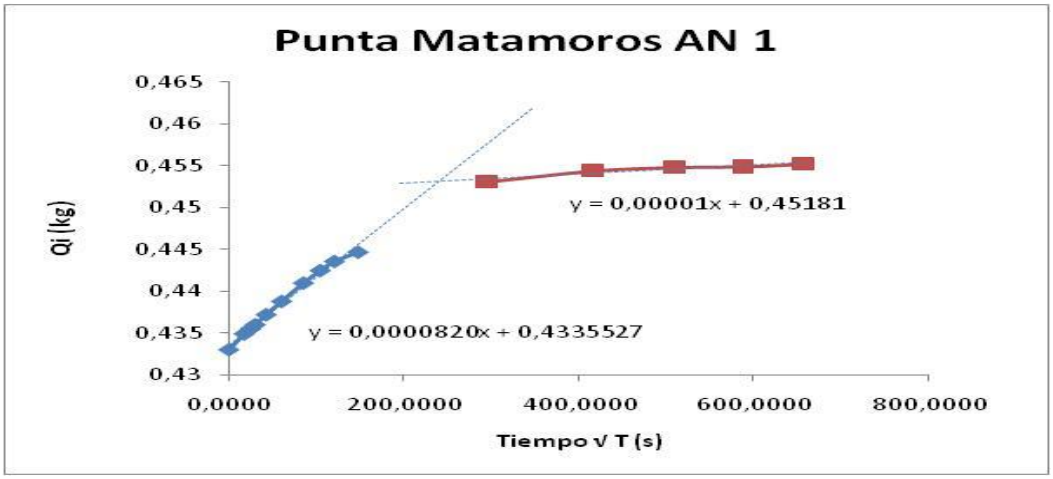


Fig. 3.8: Curva de Absorción para la muestra 1 de AN Punta Matamoros

3.5.3. Cálculo y análisis de los coeficientes de absorción

Tras el análisis de cada uno de los gráficos se calcula la resistencia a la penetración del agua, el coeficiente de absorción y la porosidad efectiva.

Ver Anexo 5 Tabla 3.11 Cálculo de resistencia a la penetración del agua, el coeficiente de absorción capilar y la porosidad efectiva.

En el gráfico 3.9, se muestra el promedio de la porosidad efectiva de los ensayos realizados a cada testigo en los diferentes sitos de exposición.

La porosidad para el caso de las muestras con áridos reciclados es mayor en todos los sitios de exposición en comparación con los áridos naturales. Diversos estudios señalan que el aumento de la porosidad en hormigones elaborados con áridos reciclados es de 1,5 a 2 veces mayor que la del hormigón con áridos naturales.(Robas 2009).

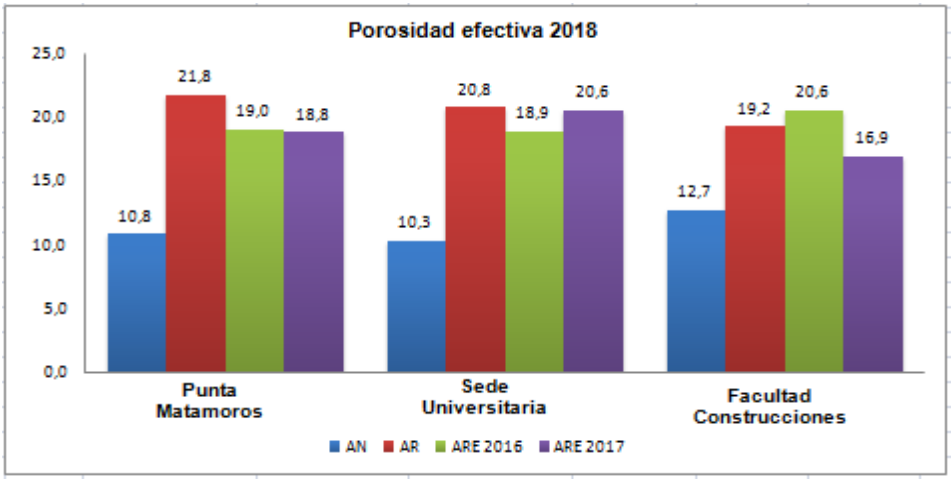


Fig. 3.9 Porosidad efectiva

Por tanto, si se compara cada valor de porosidad de AR con el correspondiente de AN, se observa que los valores están dentro del rango admisible, pero no dejan de ser valores elevados de porosidad.

El comportamiento de las muestras en la facultad, no corresponde al comportamiento en los otros sitios de exposición, esto pudo ser causado por defectos en las muestras producto de los cortes.

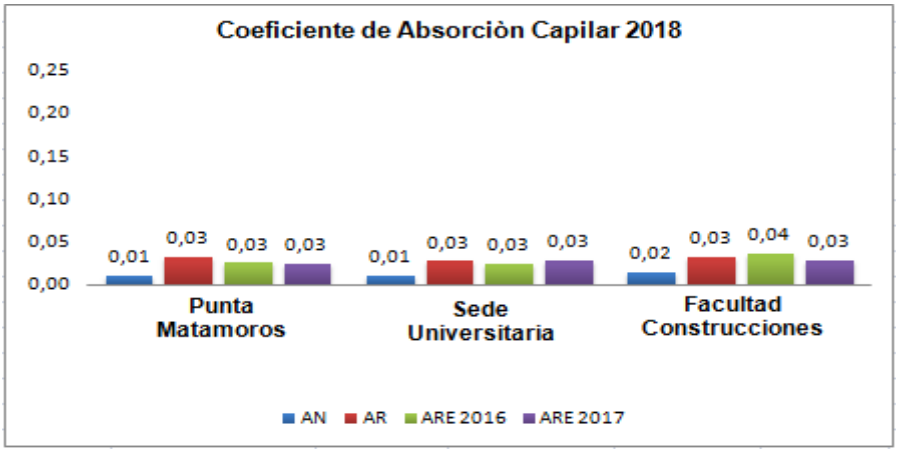


Fig. 3.10 Coeficiente de absorción capilar.

A medida que aparecen poros capilares (conectados entre sí) en las muestras de hormigón, se produce un aumento en la absorción por capilaridad y a su vez aumenta la porosidad efectiva. Existe una relación directamente proporcional entre estos factores. Al ser las muestras de AR más porosas en el orden de 1,5 a 2 veces más que las de AN (Robas, 2009), es normal que se presenten valores porosidad que dupliquen a las muestras con hormigones convencionales.
Haciendo una comparación con los valores límites admisibles (tabla 2.7, Capitulo II) para las diferentes agresividades del medio, se obtiene:

Tabla 3.10. Análisis de porosidad efectiva

Sitio de exposición	**Tipo Árido**	**Porosidad efectiva**	
Punta Matamoros	AN	10,8	No cumple
	AR	21,8	No cumple
	ARE 2016	19,0	No cumple
	ARE 2017	18,8	No cumple
Sede Universitaria	AN	10,3	No cumple
	AR	20,8	No cumple
	ARE 2016	18,9	No cumple
	ARE 2017	20,6	No cumple
Facultad Construcciones	AN	12,7	Cumple
	AR	19,2	No cumple
	ARE 2016	20,6	No cumple
	ARE 2017	16,9	No cumple

Estos valores limites están determinados para hormigones armados o pretensados. Aunque los valores de AN se encuentran por encima de los límites, la diferencia es mínima, por lo que se puede decir que cumple con este parámetro. Los valores para ARE son mejores que los obtenidos para AR, aunque presenta valores más elevados que AN. Se recomienda el uso de ARE para la producción de hormigones no armados, para evitar la corrosión del acero. Los resultados obtenidos para ARE, son menores que para AR, a causa de la encapsulación realizada a los áridos, lo que demuestra que es un proceso valido en la mejora de las propiedades del hormigón.

3.5.4. Comparación con resultados de 2017

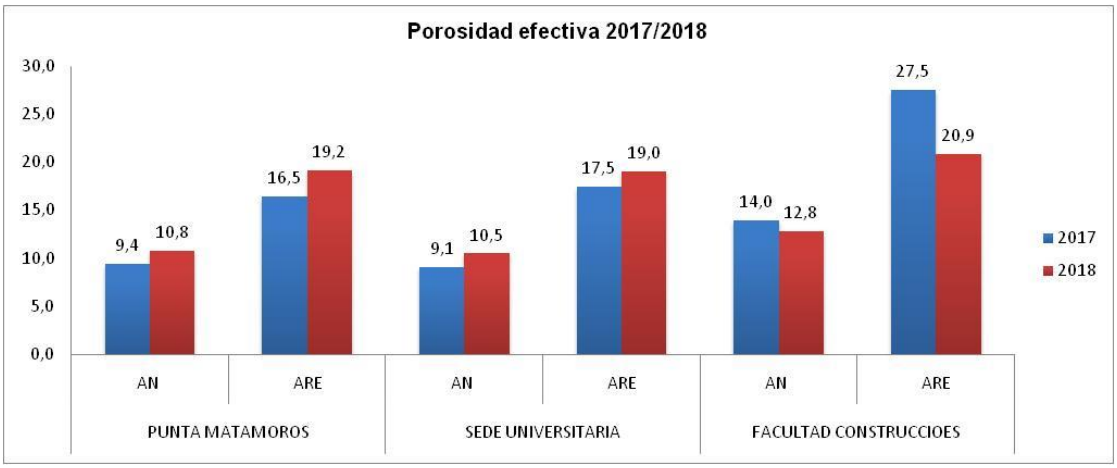


Fig. 3.11: Porosidad efectiva 2017/2018

El comportamiento de la porosidad efectiva de 2018 es relativamente mayor a los resultados obtenidos en 2017, no se presentan grandes variaciones entre los sitios de exposición.

Se produce una disminución en la porosidad efectiva AN y ARE de la facultad, esto se asocia a que las muestras fueron dañadas en el proceso del corte y por tanto varía el área de succión, y el espesor, falseando los resultados de estas muestras. El comportamiento de los AN y ARE no corresponde con el de Punta Matamoros y Sede Universitaria.

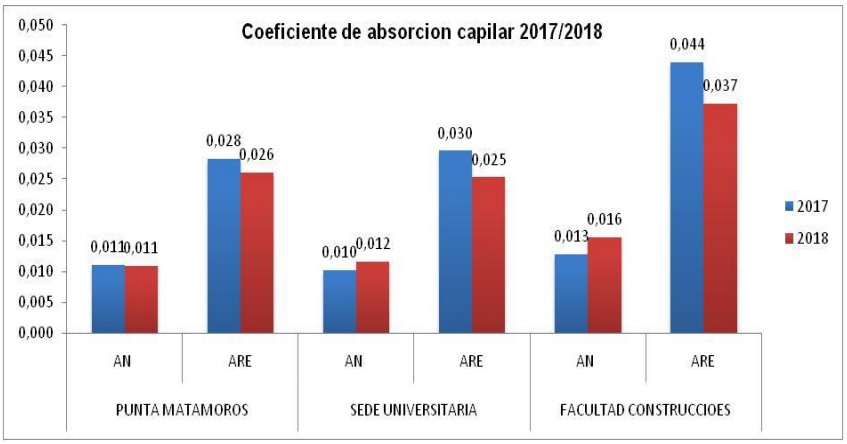


Fig. 3.12 Coeficiente de absorción capilar 2017/2018

El coeficiente de absorción capilar se relaciona con los datos antes presentados y las variaciones entre un año y otro son despreciables.

3.5.5. Conclusiones parciales

- El hormigón producido con áridos naturales presenta para los tres casos de agresividad del medio, mejores resultados en los ensayos que el hormigón elaborado con áridos reciclados.
- En el comportamiento de los hormigones con áridos reciclados encapsulados, se observan mejoras con respecto al hormigón con áridos reciclados sin encapsulación.
- Según el ensayo de permeabilidad del aire, el uso de ARE es viable para cualquier agresividad del medio, ya que mantiene una permeabilidad moderada en todos los casos de exposición, y no presentan grandes variaciones entre los ensayos de 2017 y 2018
- Se recomienda trabajar el ARE, según el ensayo de resistividad eléctrica, para elementos estructurales de hormigón no armado, sea cual sea el sitio de exposición, para evitar corrosión en las armaduras, ya que se mantiene en todos los casos de exposición con una probabilidad moderada de corrosión y una velocidad de la misma alta.
- Tomando en cuenta el ensayo de carbonatación, es recomendable el uso de ARE, ya que los valores obtenidos llegan a ser más favorables que los de AN, y mantiene carbonatación mínima en plazo de tiempo evaluado.

- De acuerdo con el ensayo de absorción por capilaridad, se recomienda que se utilice en casos donde no se maneje armadura, para evitar la corrosión de la misma, ya que en todos los casos de exposición el AR no cumple con la máxima porosidad efectiva que plantea la NC-120 2014.

Conclusiones

- Los ensayos fueron realizados a 24 muestras de hormigón, de árido reciclado y natural, expuestos en agresividades del medio distintas.
- Se utilizó tecnología novedosa y de alta precisión para los ensayos de resistividad eléctrica y permeabilidad del aire, los cuales son Torrent Permeability Tester y Resipod Family .
- Los resultados obtenidos son coherentes y seguros, pues se mantuvo el protocolo de cada ensayo.
- El hormigón con árido reciclado presenta moderada permeabilidad, poca carbonatación y absorción relativa a la del hormigón con áridos naturales.
- Es viable el uso de áridos reciclados para la fabricación de hormigón, siempre y cuando se tome en cuenta las propiedades que aporta el agregado a la mezcla, y se tomen medidas para evitar efectos negativos de estas propiedades.
- Producto de la encapsulación, se obtuvieron mejores resultados para los hormigones con áridos reciclados, por lo que es un procedimiento certero para la mejora de las propiedades de los áridos reciclados.
- Es recomendable el uso de áridos reciclados para elementos de hormigón no armado, pues los resultados de los ensayos de resistividad eléctrica y absorción por capilaridad, no son satisfactorios y asegura la rápida corrosión del acero.

Recomendaciones

- Continuar las investigaciones sobre el uso de materiales reciclados en la producción de hormigón.
- Evaluar el uso de la encapsulación como medida para mejorar las propiedades de los áridos reciclados y así mejorar la durabilidad de los hormigones que se elaboren con estos.
- Continuar el estudio de los hormigones empleados en este trabajo, para evaluar la durabilidad a diferentes edades y así obtener valores más exactos.

(1999). La durabilidad del hormigón con árido reciclado, Barcelona.

Alaejos, M. (2008). "Tipos y propiedades de áridos reciclados." Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción.

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

Balaguera, D. and B. Porras (2009). "Evaluación del efecto de la carbonatación sobre el coeficiente de difusión del ión cloruro en el concreto." Trabajo de Grado, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Universidad Industrial de Santander. Colombia.

Bañón, L. and F. d. B. Varona Moya (2012). "Hormigón Armado y Pretensado. Presentaciones (curso 2011-2012)." Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado.

Beltrán Alverdi, B. (2017). Estudio de la durabilidad del hormigón elaborado con áridos reciclados encapsulados, Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil.

Beushausen, H.-D. (2006). "Durability design criteria and permeability tests – An international overview." Concrete Plant International **series on durability test procedures for hardened concrete part 2/3**.

Coquillat, G. (1982). "Recyclage de materiaux de demolition dans la confection de Beton." CEBTP-Service d'Etudes des Matériaux Unite. Technology des Béton.

de Santos Marián, D., et al. (2010). Gestión de residuos en las obras de construcción y demolición, Tornapunta.

Dobel, T. T., R.J;Fernandez Luco, L. (2013). DETECCIÓN DE SUSTRATOS HETEROGÉNEOS MEDIANTE LA MEDICIÓN DE LA PERMEBILIDAD AL AIRE. Ingeniería. 1er Congreso ALCONPAT Universidad de Buenos Aires.

Ebensperger, L. and R. Torrent (2011). "Concrete air permeability "in situ" test: status quo." Revista Ingeniería de Construcción **25**(3): 371-382.

Fernàndez, L. M. (2016). Hormigón reciclado como áridos en hormigones estructurales. Monografias.com.

García, I. G., et al. (2011). Carbonatación del hormigón: combinación de CO2 con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH, Universidad Complutense de Madrid.

Hugo, B. V., et al. (2003). "La carbonatación en edificios de Santiago." Publicado por admin en XIV Jornadas.

LIZARAZO, F. A. G. (2015). VENTAJAS Y USOS DEL CONCRETO RECICLADO. INGENIERIA CIVIL, UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA.

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

Luna, M. À. (2018). Estudio técnico-económico del uso de áridos reciclados en la producción de hormigón. Monografias.com. **2018**.

Martirena, F. (2015). "improving quality of coarse recycled aggregate through cement coating.".

Mattio, M. E. (2014). La permeabilidad al agua como parámetro para evaluar la durabilidad del hormigón-Parte I, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

NC-318 (2003). Hormigòn endurecido.Extracciòn y preparaciòn de testigos cìlindricos.

NC-345 (2011). Absorcion de agua por capilaridad.

NC-355 (2004). Profundidad de Carbonatacion.

Nuñez, M. O. (2014). Dosificación de Hormigones con áridos reciclados mezclados con y sin finos.Residuos de planta de la Habana. Ingenieria civil Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

Oficemen (2017). El consumo de cemento se dispara en 2017 por aumento de la construcciòn de viviendas. EUROPA PRESS.

Oficemen (2018). El consumo de cemento crece un 11% en 2017.

Orozco, J. (2004). Porosidad del concreto, Guatemala.

Pablo, J. and C. Rodríguez (2016). Estudio preliminar para el uso de áridos reciclados en la normativa cubana, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil.

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

Profesionaleshoy (2018). El sector de Los áridos cierra 2017 con un 7,5% de crecimiento. Canteras y Explotaciones. Profesionaleshoy.

Resipod-Family (2015). Manual de operación. Ensayos de durabilidad de hormigón.

Rick, M. (2000). "La carbonatación, enemigo olvidado del concreto.-Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, AC." Revista Construcción y Tecnología, México.

Rios Contreras, A. (2017). Encapsulamiento de fracción gruesa en áridos reciclados utilizando cementos mezclados para la elaboración de hormigones, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil.

Rivera, G. (2010). "Concreto simple." Universidad del Cauca.

Robas, A. H. (2009). "Influencia de la variación de las propiedades del árido reciclado en el hormigón endurecido."

Romero, E. (2006). Residuos de construcción y demolición, Obtenido de https://goo. gl/JMcHrn.

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

Sánchez Rodríguez, A. (2011). "Análisis de la aplicabilidad de los áridos reciclados mixtos en hormigones."

Shane, J. D., et al. (2000). "Effect of the interfacial transition zone on the conductivity of Portland cement mortars." Journal of the American Ceramic Society **83**(5): 1137-1144.

Torrens, R. (2010). Determinación de la resistividad por métodos que emplean electrodos puntuales.

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

Valdés Vidal, G., et al. (2011). "Aplicación de los residuos de hormigón en materiales de construcción." Ingeniería y Desarrollo **29**(1).

Vélez, L. M. (2010). "Permeabilidad y porosidad en concreto." Tecno Lógicas(25).

Vidaud, E. (2012). La carbonatacion en el concreto reforzado. Construcciòn y tecnologìa en concreto. **Parte I**.

Anexo 1

Tabla 3.4: Valores obtenidos del ensayo Resistividad Eléctrica

Punta Matamoros							
Tipo áridos		**Temperatura (ºC)**	**Resistividad (kΩ)**				**Resistividad Promedio (kΩ)**
			1	**2**	**3**	**4**	
AN	**1**	25,5	30,7	29,7	31	30,3	30,4
	2	25,5	31,2	43,1	32,6	31,4	34,6
AR	**1**	25,5	5,4	5,8	6	6,1	5,8
	2	25,5	5,6	5,8	5,7	6	5,8
ARE 2016	**1**	25,5	10,1	9,8	9,1	9,5	9,6
	2	25,5	10,6	10,1	10,2	10,4	10,3
ARE 2017	**1**	25,5	8,4	8,3	8,5	8,2	8,4
	2	25,5	8,3	8,3	8,2	8,1	8,2
Sede Universitaria							
AN	**1**	24,9	33,1	31,3	30,8	35,9	32,8
	2	24,9	24,1	24,9	24,3	25	24,6
AR	**1**	24,9	6,3	6,5	6,3	6,1	6,3
	2	24,9	5,4	5,4	6	5,8	5,7
ARE 2016	**1**	24,9	9,4	9	8,5	8	8,7
	2	24,9	9,2	9,6	10,3	9,4	9,6
ARE 2017	**1**	24,9	6,8	6,5	6,4	6,8	6,6
	2	24,9	6,5	6,1	6	6,2	6,2
Facultad Construcciones							
AN	**1**	26	31,6	31,8	29,9	34,5	32
	2	26	28,7	26,3	30	28,2	28,3
AR	**1**	25	6,8	7,9	7,2	7,1	7,3
	2	25	7,5	7,6	7,5	7,3	7,5
ARE 2016	**1**	26	9	9,8	9,7	9,3	9,5
	2	26	9,8	9,1	9,1	9,3	9,3
ARE 2017	**1**	25	7,8	7,9	8,5	7,6	8
	2	25	8,6	9,2	9	8,7	8,9

Anexo 2

Tabla 3.5: Valores corregidos del ensayo Resistividad Eléctrica

Punta Matamoros									
Tipo áridos		**Temperatura (ºC)**	**Resistividad (kΩ)**				**Resistividad Prom (Ω)**	**Resistividad Media (kΩ)**	**Desviación estándar**
			1	**2**	**3**	**4**			
AN	**1**	25,5	36,8	35,6	37,1	36,3	36,4	37,6	1,7
	2	25,5	37,4	40,8	39,0	37,6	38,7		
AR	**1**	25,5	6,5	6,9	7,2	7,3	7,0	6,9	0,6
	2	25,5	6,7	6,9	6,8	7,2	6,9		
ARE 2016	**1**	25,5	12,1	11,7	10,9	11,4	11,5	11,9	0,1
	2	25,5	12,7	12,1	12,2	12,5	12,4		
ARE 2017	**1**	25,5	10,1	9,9	10,2	9,8	10,0	9,9	0,3
	2	25,5	9,9	9,9	9,8	9,7	9,9		
Sede Universitaria									
AN	**1**	24,9	38,8	36,7	36,1	42,1	38,4	33,6	5,4
	2	24,9	28,3	29,2	28,5	29,3	28,8		
AR	**1**	24,9	7,4	7,6	7,4	7,2	7,4	7,0	0,6
	2	24,9	6,3	6,3	7,0	6,6	6,6		
ARE 2016	**1**	24,9	11,0	10,6	10,0	10,6	10,5	10,9	0,4
	2	24,9	10,8	11,3	12,1	11,0	11,3		
ARE 2017	**1**	24,9	8,0	7,6	7,5	8,0	7,8	7,5	0,5
	2	24,9	7,6	7,2	7,0	7,3	7,3		
Facultad Construcciones									
AN	**1**	26	38,5	38,8	36,5	42,1	39,0	36,7	3,1
	2	26	35,0	32,1	36,6	34,4	34,5		
AR	**1**	25	8,0	9,3	8,5	8,4	8,5	8,4	0,4
	2	25	8,8	8,9	8,8	8,6	8,8		
ARE 2016	**1**	26	11,0	12,0	11,8	11,3	11,5	11,4	0,7
	2	26	12,0	11,1	11,1	11,3	11,4		
ARE 2017	**1**	25	9,2	9,3	10,0	8,9	9,4	8,9	0,4
	2	25	10,1	10,6	10,8	10,2	10,4		

Anexo 3

Tabla 3.8 Resultados del ensayo Carbonatación

Punta Matamoros							
Tipo de Árido	**Muestra**	**Mediciones**				**Promedio**	**Desviación estándar**
		1	**2**	**3**	**4**		
AN	**1**	0,2	0,1	0	0	0,08	0,1
	2	0,1	0,3	0	0	0,1	0,14
AR 2017	**1**	0	0	0	0	0,03	0,05
	2	0	0	0	0	0	0
ARE 2016	**1**	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0
ARE 2017	**1**	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0
Sede Universitaria							
AN	**1**	0,2	0,4	0,3	0,3	0,3	0,08
	2	0,2	0,4	0,2	0,4	0,3	0,12
AR 2017	**1**	0,6	0,3	0,4	0,6	0,5	0,15
	2	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,05
ARE 2016	**1**	0	0	0,2	0	0,1	0,10
	2	0	0,1	0,1	0	0,1	0,06
ARE 2017	**1**	0	0,2	0,1	0	0,1	0,10
	2	0,4	0,3	0	0	0,2	0,21
Facultad Construcciones							
AN	**1**	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	0,08
	2	0,3	0,1	0,2	0,1	0,2	0,10
AR 2017	**1**	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0,1	0,1
ARE 2016	**1**	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0
ARE 2017	**1**	0	0,1	0	0,1	0,1	0,06
	2	0	0	0	0	0	0

Anexo 4

Tabla 3.10 Velocidad de absorción

ABSORCIÒN																		
Sitio de exposición	Tipo de árido	T (h)	con parafina (g)	1/12	1/6	1/4	1/2	1	2	3	4	6	24	48	72	96	120
		T (min)		5,00	10,00	15,00	30,00	60,00	120,00	180,00	240,00	360,00	1440,00	2880,00	4320,00	5760,00	7200
		√ T (s)		17,3205	24,4949	30,0000	42,4264	60,0000	84,8528	103,9230	120,0000	146,9694	293,9388	415,6922	509,1169	587,8775	657,27
Punta Matamoros	AN	1	433,0	434,9	435,5	436,0	437,2	438,8	441,0	442,5	443,6	444,7	453,1	454,4	454,8	454,9	455,2
		2	469,7	471,8	472,6	473,2	474,3	476,0	478,0	479,7	480,9	482,0	491,2	493,8	494,3	494,4	494,9
	AR	1	359,6	366,8	368,3	371,2	375,4	381,2	384,9	387,2	389,5	390,3	398,9	399,4	399,6	399,4	399,7
		2	417,6	424,9	426,5	430,2	434,6	440,7	445,1	447,8	450,4	451,3	464,7	465,6	465,8	465,8	466,0
	ARE 2016	1	401,2	406,2	408,0	409,4	412,1	415,8	420,6	424,1	426,6	429,2	438,3	438,8	438,9	439,0	439,4
		2	383,3	388,0	389,7	391,1	393,9	397,7	402,7	406,3	408,8	411,3	419,5	419,9	420,0	420,0	420,3
	ARE 2017	1	380,3	386,3	387,5	390,1	393,6	397,9	401,1	403,1	405,1	406,0	416,4	416,9	417,4	417,1	417,6
		2	376,0	382,0	383,2	385,9	389,2	393,7	397,0	399,0	401,0	401,8	412,3	412,9	413,0	413,0	413,3
Sede Cayo Santa María	AN	1	455,8	458,7	458,9	459,3	460,6	462,2	464,1	465,6	466,7	467,6	475,0	476,6	476,9	477,1	477,4
		2	435,2	436,9	438,5	439,2	440,6	442,4	444,7	446,3	447,6	448,8	457,4	458,8	459,1	459,0	459,4
	AR	1	411,0	418,3	419,8	423,2	427,6	433,3	437,3	439,9	442,4	443,2	456,9	457,6	457,9	457,9	458,4
		2	366,9	372,7	374,1	376,7	380,2	384,7	387,9	389,8	391,7	392,7	404,5	405,5	405,7	405,8	406,1
	ARE 2016	1	393,8	398,4	400,2	401,6	404,5	408,4	413,3	416,9	419,4	421,9	431,7	432,2	432,4	432,3	432,8
		2	372,6	377,3	379,1	380,3	382,9	386,2	390,7	394,0	396,4	398,9	407,2	407,8	407,9	407,9	408,2
	ARE 2017	1	403,0	409,4	410,7	412,7	417,1	421,8	425,0	427,1	429,1	429,7	442,2	443,5	443,9	443,8	444,0
		2	379,1	386,7	388,4	391,2	395,7	401,2	405,1	407,4	409,7	410,7	420,8	421,2	421,4	421,4	421,6
Facultad de Construcciones	AN	1	462,3	465,8	466,7	467,5	468,9	471,2	473,5	475,8	477,5	480,1	488,7	489,8	489,9	490	490,1
		2	458,3	461,4	462,3	463,1	464,8	466,9	469,8	471,9	473,6	476,1	485,5	486	486,5	487,4	487,4
	AR 2017	1	397,3	403,7	405,7	407,2	410,8	415,6	422,1	426,7	430,2	434,5	438,5	438,6	438,8	439,8	439,9
		2	443,7	449,6	451,9	453,4	456,7	461,5	467,4	471,7	475	479,9	487,1	487,6	488,1	489,1	489,1
	ARE 2016	1	370,0	377	379,5	381,3	385,2	390,2	397,1	401,8	405,1	409,2	412,4	412,5	412,6	413,3	413,4
		2	356,0	362,6	364,9	366,9	370,3	375	380,7	384,9	388	392	396,3	396,4	396,4	397,4	397,6
	ARE 2017	1	436,5	441,4	443,1	444,6	447,8	452	457,2	460,7	463,7	467,8	476,6	477,4	480,4	487,3	487,4
		2	375,0	379,9	381,9	383,4	386,9	391,4	397,1	401,1	404	408,2	411,9	412,1	412,5	412,6	413

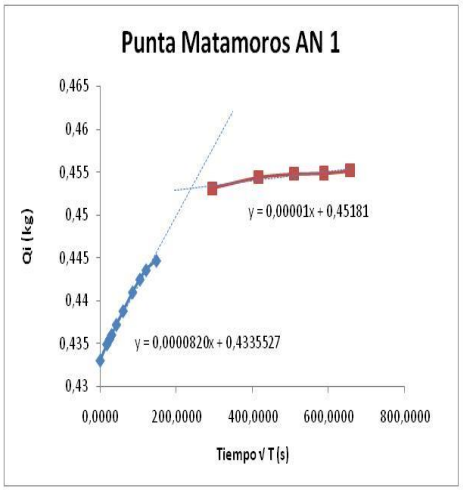
Anexo 5

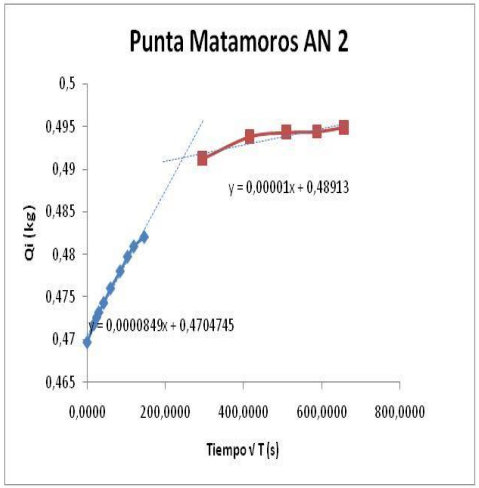
Tabla 3.11 Cálculo de resistencia a la penetración del agua, el coeficiente de absorción capilar y la porosidad efectiva

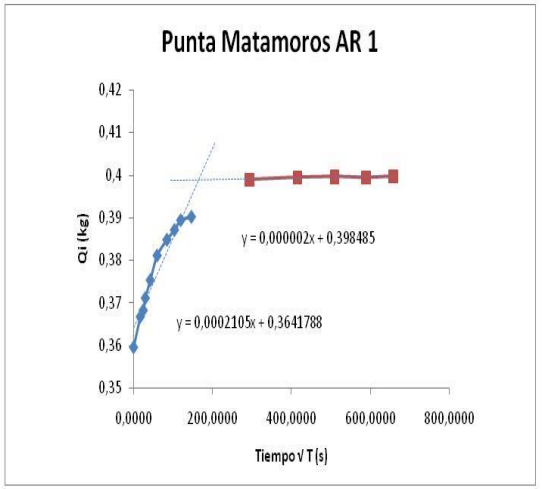
			tn(s)	h(m)	Q0 (kg)	Qn (kg)	Qn-Q0(kg)	A (m2)	Porosidad efectiva	Promedio porosidad efect	coef absorcion capilar	prom coef absorc
PUNTA MATAMOROS	AN	1	66122,4	0,0245	0,4330	0,4536	0,0206	0,0079	10,7	10,8	0,01	0,01
		2	73673,5	0,0255	0,4697	0,4917	0,0220	0,0079	11,0		0,01	
	AR	1	28972,4	0,0248	0,3596	0,3983	0,0387	0,0078	20,1	21,8	0,03	0,03
		2	37340,4	0,0260	0,4176	0,4646	0,0470	0,0077	23,5		0,03	
	ARE 2016	1	33240,7	0,0248	0,4012	0,4375	0,0363	0,0079	18,7	19,0	0,03	0,03
		2	32707,1	0,0240	0,3833	0,4194	0,0361	0,0078	19,3		0,03	
	ARE2017	1	36512,6	0,0243	0,3803	0,4156	0,0353	0,0079	18,5	18,8	0,02	0,02
		2	35599,9	0,0235	0,3760	0,4114	0,0354	0,0079	19,2		0,02	
SEDE UNIVERSITARIA	AN	1	53770,2	0,0255	0,4558	0,4744	0,0186	0,0079	9,3	10,3	0,01	0,01
		2	54083,3	0,0248	0,4352	0,4572	0,0220	0,0079	11,3		0,01	
	AR	1	36463,7	0,0258	0,4110	0,4558	0,0448	0,0079	22,1	20,8	0,03	0,03
		2	38987,4	0,0240	0,3669	0,4038	0,0369	0,0079	19,4		0,02	
	ARE 2016	1	66230,5	0,0248	0,3938	0,4318	0,0380	0,0078	19,7	18,9	0,02	0,02
		2	33252,6	0,0238	0,3726	0,4064	0,0338	0,0079	18,1		0,02	
	ARE2017	1	55022,1	0,0250	0,4030	0,4422	0,0392	0,0079	20,0	20,6	0,02	0,03
		2	31358,5	0,0248	0,3791	0,4204	0,0413	0,0079	21,2		0,03	
FACULTAD CONSTRUCCIONES	AN	1	50310,1	0,0265	0,4623	0,4889	0,0266	0,0079	12,8	12,7	0,02	0,02
		2	48480,8	0,0263	0,4583	0,4843	0,0260	0,0079	12,6		0,02	
	AR	1	23376,1	0,0263	0,3973	0,4376	0,0403	0,0078	19,7	19,2	0,03	0,03
		2	28504,0	0,0288	0,4437	0,4860	0,0423	0,0079	18,7		0,03	
	ARE 2016	1	22559,3	0,0265	0,3700	0,4115	0,0415	0,0078	20,1	20,6	0,04	0,04
		2	22434,0	0,0265	0,3560	0,3946	0,0386	0,0069	21,0		0,04	
	ARE2017	1	32660,8	0,0280	0,4365	0,4711	0,0346	0,0079	15,8	16,9	0,02	0,03
		2	30460,1	0,0253	0,3750	0,4105	0,0355	0,0078	18,1		0,03	

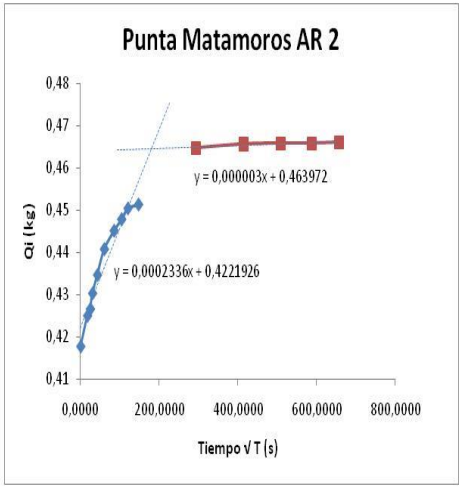
Anexo 6

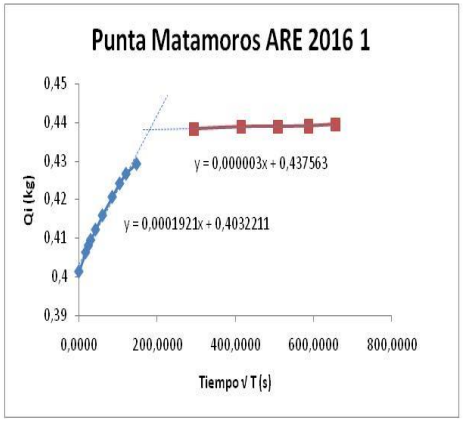
Curvas de absorción de agua, obtenidas por el ensayo de capilaridad. Punta Matamoros

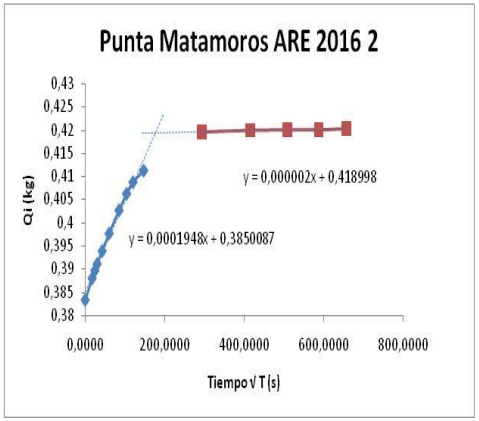


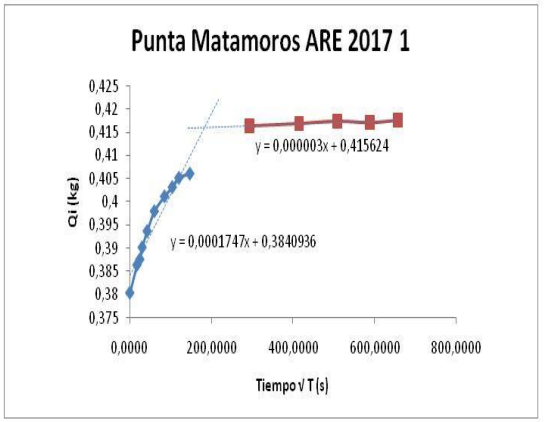


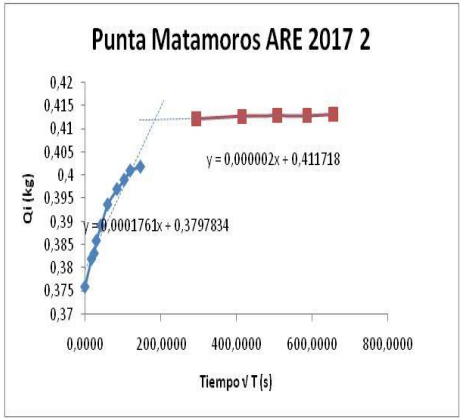






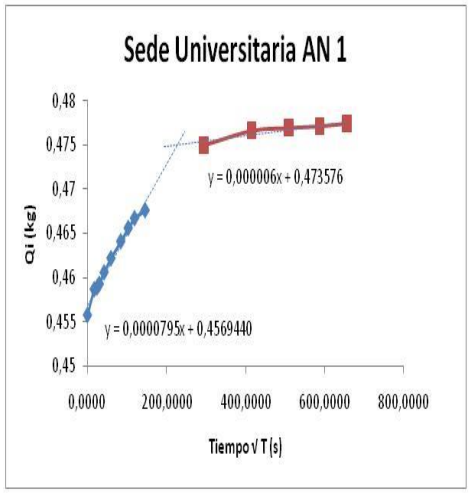


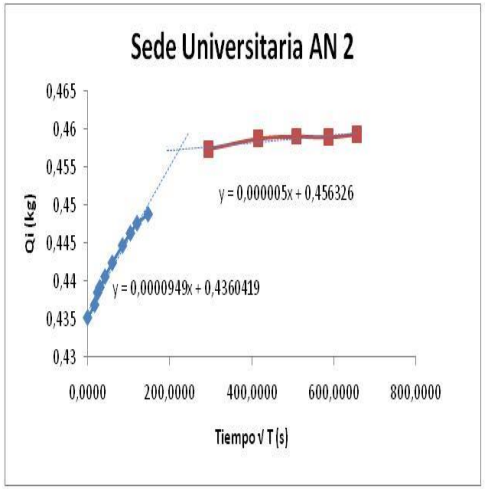


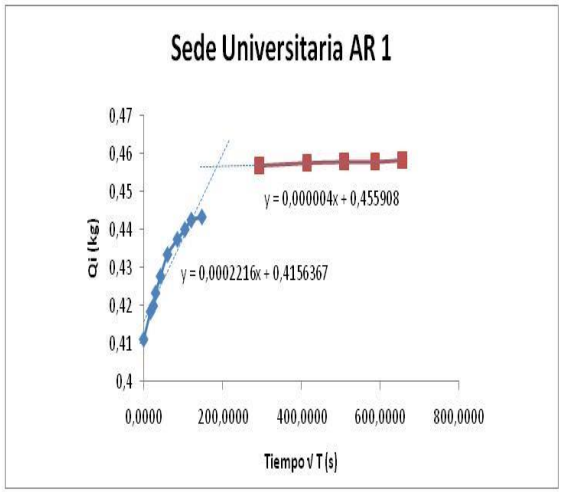


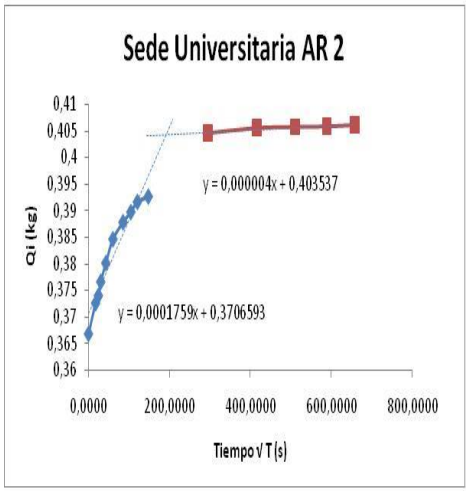
Anexo 7

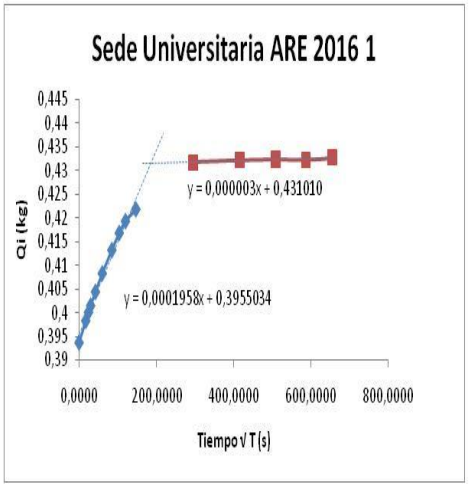
Curvas de absorción de agua, obtenidas por el ensayo de capilaridad. Sede Universitaria

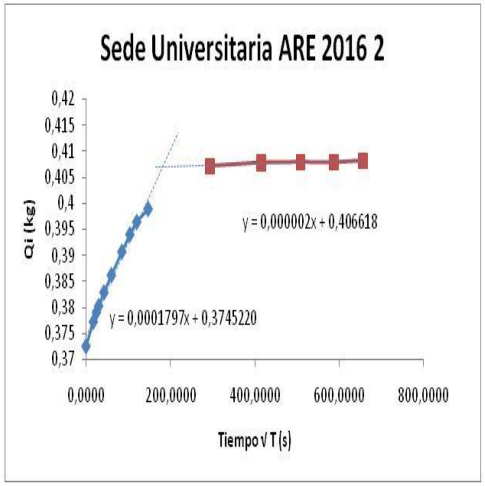


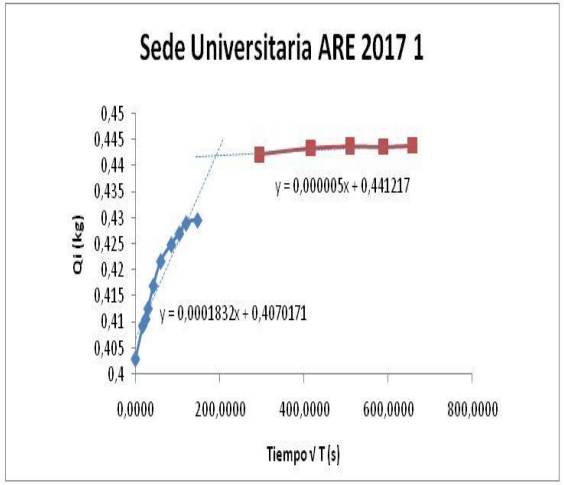


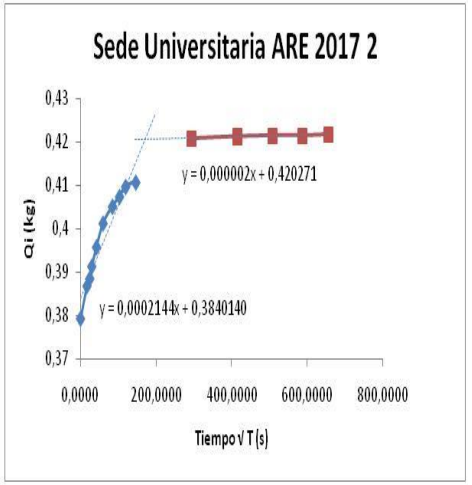


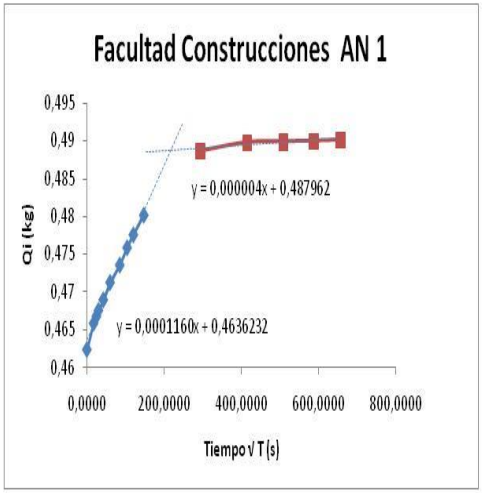
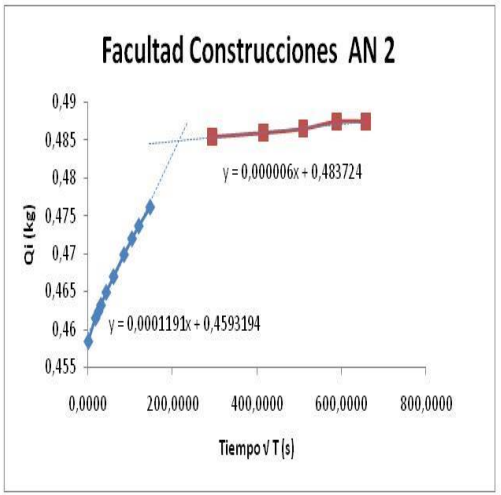
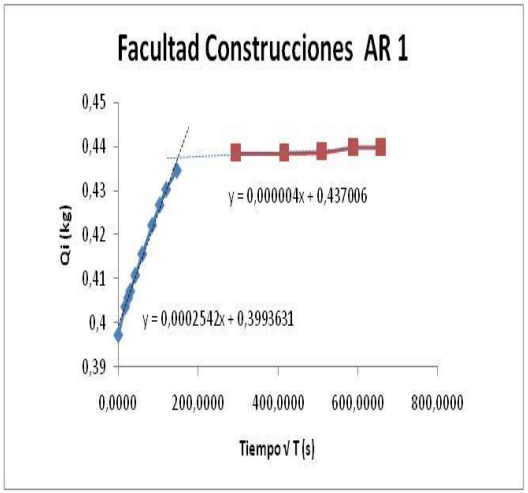
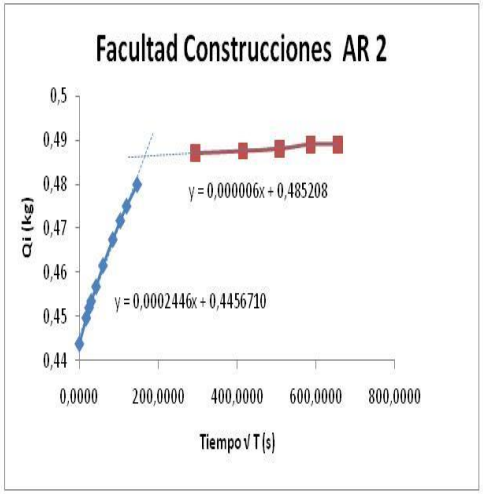
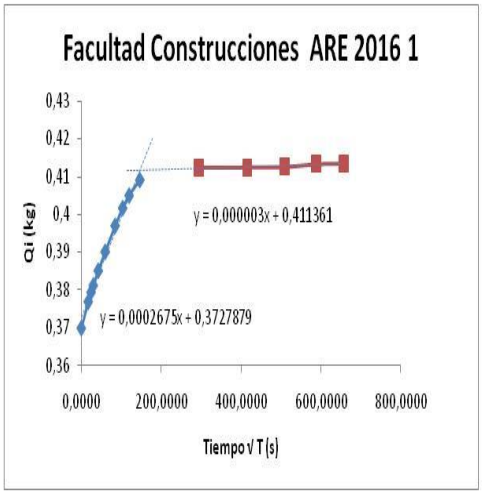
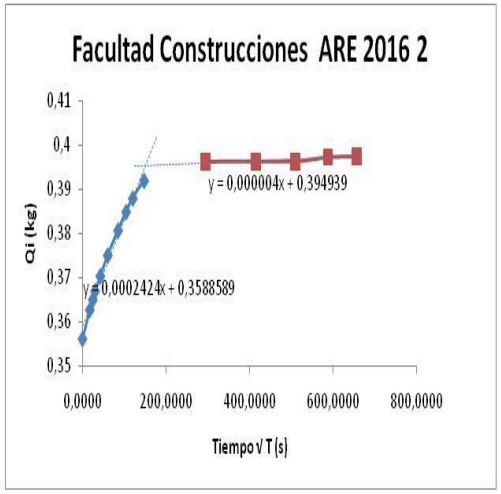
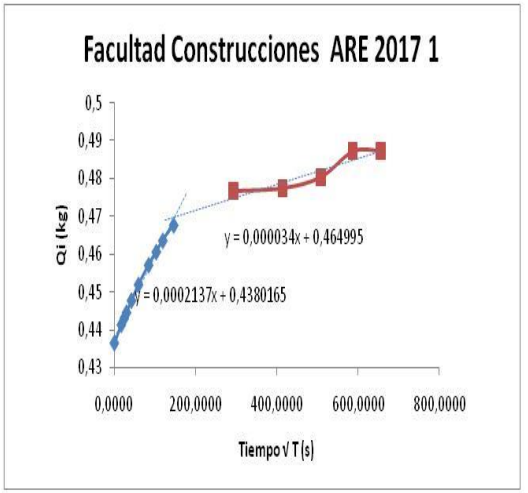
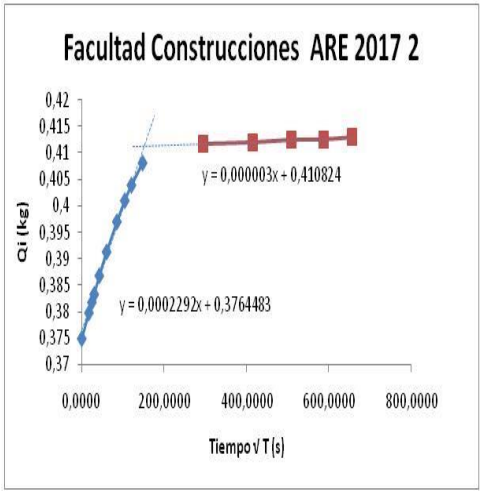










Anexo 8

Curvas de absorción de agua, obtenidas por el ensayo de capilaridad. Facultad de Construcciones