



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil



TRABAJO DE DIPLOMA

Encapsulamiento de fracción gruesa en áridos reciclados utilizando cementos mezclados para la elaboración de hormigones.

Autor: Ailin Rios Contreras

Tutor: MSc. Sandra Lichtblau

Consultante: Dr. Ing. Fernando Martirena

Santa Clara
2017

"Año 59 de la Revolución"



Pensamiento

...Todo camino nuevo es un camino difícil, es un camino esforzado...

Fidel Castro Ruz.

Dedicatoria

A mi querida abuela Vicenta.

A mis padres que han sido mi motor impulsor, mi más gran y fiel apoyo.

*A mi familia que tanto adoro y me siento verdaderamente orgullosa de ser parte de
ella.*

*A mis amigos, ha sido un privilegio tenerlos a mi lado transitando por este corto, pero
maravilloso camino que es la vida.*

Agradecimientos

A mis padres por todo el amor, esfuerzo, educación y preocupación incondicional que me han brindado en todos estos años.

A mi querida familia que son mi orgullo por el gran cariño que nos une.

A mis amigos por todos los momentos malos y buenos que hemos pasado juntos, sé que en ellos tengo un gran apoyo.

A mi tutora Sandra por su paciencia y dedicación durante todo este tiempo, a la que también puedo considerar una amiga.

A Brayan y Anika por tanto tiempo trabajando en el laboratorio para que todo saliera a tiempo, dedicando horas de esfuerzo.

A los técnicos del laboratorio Felipe y Yoel, y a la profesora Giselle Limonte por toda la ayuda brindada.

A mis profesores en general por estos años de educación.

A todos los que se interesaron por el tema...

Muchas Gracias...

Resumen

La presente investigación con el título “Encapsulamiento de fracción gruesa en áridos reciclados utilizando cementos mezclados para la elaboración de hormigones” tiene como objetivo demostrar que la encapsulación de áridos reciclados disminuye la absorción de agua en hormigones hidráulicos aumentando así la resistencia a compresión. Para ello se caracterizaron los materiales a emplear, rigiéndose, en el caso de los áridos, por la NC 251 “Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos.” Se encapsuló la fracción de 5-9 mm con el objetivo de que esta fina capa cubra los poros del árido que provocan una elevada absorción de agua, afectando las propiedades del hormigón. Para ello se probó con dos aglomerantes diferentes LC3 y P-35 y para dos proporciones de estos materiales (60 kg/m^3 y 40 kg/m^3) decidiendo entre ellos la mejor mezcla para la encapsulación. A partir de esta se realizó el hormigón, demostrando que dicha encapsulación, aumenta la resistencia a compresión del mismo.

Abstract

The present research aims to study the behavior of hydraulic concretes encapsulating the intermediate fraction of recycled aggregates. For this purpose, the materials to be used were characterized, in the case of aggregates, by NC 251 "Aggregates for hydraulic concretes. Requirements." The fraction of 5-9 mm was encapsulated with a thin layer of cement to cover the pores of this aggregate which affect the concrete properties due to its high water absorption. For the encapsulation two different cements were tested, LC3 and PP-35. For each cement two proportions (60 kg/m³ and 40 kg/m³) were fabricated to decide the best encapsulation of the four mixtures. Further studies of fabricated concrete with the encapsulated fraction results in an increase of its strength.

Índice

Pensamiento	I
Dedicatoria	II
Agradecimientos.....	III
Resumen	IV
Abstract	V
Índice	VI
Introducción	1
Capítulo 1: Estado del arte sobre la utilización de áridos reciclados en la producción de hormigón estructural.....	5
1.1 Concepto de Residuos de Construcción y Demolición (RCD).....	5
1.2 Tipos de RCD.	5
1.3 Procedimientos de demolición.	6
1.4 Propiedades del Árido Reciclado	6
1.4.1 Granulometría.....	6
1.4.2 Densidad.....	7
1.4.3 Absorción.....	7
1.4.4 Porosidad.....	7
1.4.5 Forma y textura superficial.....	8
1.5 Propiedades del hormigón utilizando áridos reciclados.....	8
1.5.1 Hormigón reciclado en estado fresco	8
1.5.2 Propiedades del hormigón con áridos reciclados en estado endurecido	9
1.6 Ventajas del uso de áridos reciclados.....	11
1.7 Desventajas	11
1.8 Encapsulación del árido reciclado.....	11
1.9 Situación a nivel mundial de los RCD	12

1.10 Experiencias mundiales de uso de hormigón con áridos reciclados.....	13
1.11 Conclusiones parciales del capítulo.....	14
Capítulo 2: Diseño y elaboración de las mezclas de hormigón con áridos reciclados.	16
2.1 Introducción al capítulo.....	16
2.2 Selección de escombros que conforman los áridos reciclados.....	16
2.3 Molienda y trituración de los áridos reciclados.....	16
2.4 Caracterización de los materiales a emplear.	17
2.4.1 Aditivo	17
2.4.2 Áridos naturales	18
2.4.3 Áridos reciclados.....	20
2.5 Cemento	28
2.6 Diseño del plan experimental.....	29
2.7 Encapsulación del material de 5-9 mm.....	30
2.7.1 Cálculo de la Encapsulación	32
2.7.2 Determinación de la mezcla óptima	33
2.7.3 Cantidad de material a encapsular.....	34
2.8 Diseño de mezcla para la elaboración de hormigón.	37
2.8.1 Elaboración de hormigones.....	37
2.8.2 Llenado de probetas, compactación y curado.	39
2.9 Ensayos al hormigón en estado endurecido.	40
2.10 Conclusiones parciales.	42
Capítulo 3: Análisis de los Resultados	42
3.1 Introducción	42
3.2 Propiedades de los áridos reciclados	42
3.2.1 Análisis granulométrico.	42
3.2.2 Tamiz 200	44

3.2.3 Peso Específico	45
3.2.4 Peso Volumétrico	46
3.2.5 Absorción de agua (10 min)	46
3.3 Ensayos del hormigón endurecido.....	47
3.4 Conclusiones parciales.	51
Conclusiones Generales	52
Recomendaciones	53
Bibliografía.....	54
Anexo 1.....	56
Anexo 2.....	57
diferencia abs. 10 min y humedad	57

Introducción

La construcción es una de las esferas más importantes de la sociedad. En esta área el hormigón representa uno de los productos más utilizados a nivel mundial, se conoce que se producen anualmente cerca de 12 billones de m³ del mismo. Este está compuesto por al menos tres elementos básicos, cemento, agua y áridos, estos últimos aportan una elevada resistencia mecánica a la mezcla y disminuyen la cantidad de cemento de la misma, contribuyendo así económicamente. Es por esto que constituyen la mayor parte del volumen de hormigón.

Debido a la gran explotación de los áridos para los fines constructivos, un gran número de canteras se encuentran agotadas. Por otra parte, edificaciones que han cumplido con su período de vida útil se encuentran en estado de demolición. También existen los residuos de la construcción que pueden aún cumplir diversas funciones, estos reciben el nombre de Residuos de la Construcción y Demolición (RCD). Son a su vez de gran provecho los escombros que quedan tras el paso de fenómenos meteorológicos dejando grandes destrucciones. Los áridos reciclados son una de las alternativas para continuar construyendo a pesar del agotamiento de áridos naturales.

En los procesos de construcción y demolición, gran parte de los residuos generados son de origen pétreo y salvo pequeños porcentajes que pueden estar contaminados, habitualmente el resto está en condiciones de ser reutilizado tras una serie de procesos más o menos complejos. (Baéz, 2010)

La utilización de árido reciclado es cada vez más habitual en el campo de la construcción, en ámbitos muy variados como son la construcción de explanaciones (terraplenes y rellenos), capas de firmes de carreteras, o en la fabricación de hormigón. Los destinos de estos materiales reciclados dependerán de la naturaleza o composición mayoritaria de los residuos. (Anon., 2010)

Los áridos reciclados deben pasar por una serie de procesos para volver a ser utilizados como son el machacado de los bloques de hormigón y luego el triturado en una planta de áridos reciclados. Este proceso de trituración trae consigo que los áridos sean desfavorables en cuanto a sus propiedades ya que aumenta las zonas débiles de los mismos por la presencia de mortero adherido al árido inicial.

El empleo de áridos reciclados en la fabricación de hormigón afecta las propiedades del mismo. Los resultados obtenidos en su empleo para la fabricación de hormigón presentan

diferencias como consecuencia de la heterogeneidad que presentan los distintos áridos reciclados con los que se fabrican. (Calderón, 2014)

Debido al aumento de la cantidad de pasta de cemento endurecida que se introduce en los hormigones que incorporan áridos reciclados el módulo de elasticidad y las resistencias en general se reducirán. Sin embargo, la retracción, fluencia y coeficiente de expansión térmica se verán incrementados en comparación con hormigones de similares resistencias que contienen áridos convencionales.

Los hormigones reciclados demandan una mayor cantidad de agua para lograr similares consistencias que los hormigones convencionales, debido a los elevados valores de absorción de agua que presentan los áridos reciclados, en comparación con los áridos naturales, por lo que es preciso, para mantener la relación agua/cemento efectiva cuando se sustituye árido natural por reciclado en el hormigón, corregir la cantidad de agua total de la mezcla, adicionando el agua que absorberá el árido reciclado durante el amasado. (Fé, 2012)

Los áridos reciclados en su composición presentan adherido al árido natural mortero, el cual constituye la causa fundamental de las diferencias en las propiedades de los áridos naturales y los áridos reciclados. Por la presencia de mortero adherido, los áridos reciclados presentan menor densidad que los naturales y un mayor porcentaje de absorción. (Fé, 2012)

La presente investigación está destinada a recomendar una solución viable a esta problemática mediante la encapsulación del árido reciclado.

El **problema científico** de esta investigación se basa en ¿cómo llegar a un hormigón más resistente con 100% áridos reciclados, encapsulando la fracción 5-9 mm de dichos áridos, mitigando el problema de absorción de agua?

Por lo que se plantea la siguiente **hipótesis**: A partir del encapsulamiento de la fracción gruesa en áridos reciclados para la producción de hormigones hidráulicos es posible obtener valores de resistencia a la compresión semejantes a los obtenidos en hormigones con áridos naturales.

Objeto de investigación: Encapsulación en áridos reciclados para la elaboración de hormigones.

Campo de Acción: Evaluación de la resistencia de las probetas de hormigón con áridos reciclados encapsulados para la elaboración de hormigones.

En correspondencia con la hipótesis planteada el **objetivo general** consiste en: Demostrar que la encapsulación de áridos reciclados disminuye la absorción de agua en hormigones hidráulicos aumentando así la resistencia a compresión.

Objetivos específicos:

- Constatar los fundamentos científicos que sustentan la producción de hormigón hidráulico con áridos reciclados a partir de una profunda revisión bibliográfica sobre el tema.
- Caracterizar las propiedades de los áridos reciclados (cemento, áridos y adiciones de los hormigones) según NC 251.
- Obtener la mezcla más adecuada para la encapsulación de la fracción gruesa del árido reciclado y el impacto en la producción de probetas de hormigón empleando dicha tecnología.
- Evaluar mediante ensayos las propiedades de la mezcla de hormigón y el impacto de la encapsulación en las mismas que se utilizará en la elaboración de las probetas.

Tareas científicas:

- Realización de la revisión bibliográfica correspondiente, que determine los fundamentos científicos que sustentan la producción de hormigón hidráulico con áridos reciclados.
- Caracterización de las propiedades del cemento, adiciones y los áridos según NC 251.
- Elaboración de las mezclas de hormigón con las diferentes encapsulaciones de la fracción gruesa de los áridos reciclados.
- Determinación de la mezcla más adecuada para la encapsulación del material 5-9 mm.
- Elaboración de la mezcla de hormigón con árido reciclado encapsulado.
- Evaluación de los resultados mediante ensayos de las propiedades de la mezcla de hormigón realizada.

La **novedad científica** de esta investigación radica en la fina capa de cemento que recubre la fracción gruesa del árido reciclado con el objetivo de disminuir el problema de absorción de agua, aumentando así la resistencia a compresión.

Justificación de la investigación:

- Agotamiento de los recursos naturales disponibles.
- Necesidad de reutilizar los escombros de la construcción.
- Mitigar el impacto ambiental producido por los escombros que generan los procesos constructivos.

- Se hace necesario la implementación de un método que aumente la resistencia del hormigón con áridos reciclados.

Estructura del trabajo: La investigación consta con un resumen, introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones y anexos.

Resumen: Se presenta de manera general en qué consiste la investigación brindando así una idea rápida y precisa del tema.

Introducción: Se exponen los antecedentes del trabajo y el diseño técnico de la investigación.

Capítulo I: Estado del arte sobre el empleo de áridos reciclados en la producción de hormigón hidráulico.

Capítulo II: Diseño y elaboración de las mezclas que se utilizaran en la producción de probetas de hormigón empleando áridos reciclados encapsulados. Este capítulo se propone caracterizar los materiales, los ensayos realizados y la descripción del plan experimental.

Capítulo III: Análisis de los resultados alcanzados en la producción de probetas de hormigón empleando áridos reciclados encapsulados.

Conclusiones: Abarca la exposición precisa de los resultados obtenidos durante la investigación

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos.

Capítulo 1: Estado del arte sobre la utilización de áridos reciclados en la producción de hormigón estructural.

1.1 Concepto de Residuos de Construcción y Demolición (RCD).

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

Los RCD son los residuos que proceden de la construcción, rehabilitación y demolición de los edificios, de las obras públicas y de las obras de urbanización. El reciclaje de los residuos de la construcción y demolición permite la obtención de un material fragmentado que es utilizado como agregado y tiene diferentes usos en la construcción. La Gestión de los RCD constituye un aspecto de suma importancia a nivel mundial porque representa un beneficio medioambiental producto a la disminución de residuos que se depositan en vertederos, evitando así, el incremento y proliferación de estos. (Izquierdo, s.f.)

La utilización de RCD de hormigones provenientes de demolición de edificios o infraestructuras se ha venido utilizando en su gran mayoría en bases y sub-bases de carreteras, en rellenos, drenajes, camas de asiento de tuberías y hormigón en masa. En noviembre de 2002, a instancias de la Comisión Permanente del Hormigón, se constituyó el Grupo de Trabajo 2/5 Hormigón Reciclado con la finalidad de elaborar una serie de recomendaciones para la utilización de dichos residuos en hormigón estructural. Entre dichas recomendaciones se aconseja la utilización de árido reciclado procedente de hormigón convencional, se excluye el uso de árido reciclado en hormigón pretensado y se contempla la sustitución del árido grueso en cantidades no superiores al 20% sin necesidad de estudios y ensayos complementarios. (Calderón, 2014)

1.2 Tipos de RCD.

El término RCD cubre un amplio rango de materiales. Las categorías más simples son:

- Residuos procedentes de demoliciones totales o parciales de edificios u obras civiles
- Residuos procedentes de la construcción de edificios o infraestructuras de obra civil.
- Suelos, rocas o vegetación procedentes de nivelaciones o cimentaciones.
- Carreteras, construcción y mantenimiento.

1.3 Procedimientos de demolición.

El proceso de demolición más adecuado depende de muchos factores, de forma que cada elemento de construcción deberá estudiarse cuidadosamente: necesidades del lugar dónde se encuentra (agua, electricidad, aceite, oxígeno...), requerimiento de personal, precauciones a tomar, requerimiento de plazos, precisión necesaria, ruidos, vibraciones y costos. Los materiales resultantes de la demolición se trasladan a las plantas de reciclaje. (Fonteboa, 2002)

1.4 Propiedades del Árido Reciclado

El empleo de áridos reciclados en la fabricación de hormigón afecta a las propiedades del mismo. Los resultados obtenidos en su empleo para la fabricación de hormigón presentan diferencias como consecuencia de la heterogeneidad que presentan los distintos áridos reciclados con los que se fabrican. La principal diferencia entre los áridos reciclados y los áridos naturales estriba en la cantidad de mortero adherido que incorporan los primeros debido al hormigón original 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. El hormigón fabricado con ellos estará directamente condicionado por dichas propiedades. (Calderón, 2014)

1.4.1 Granulometría

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

La cantidad de árido grueso generado oscila entre el 70% y el 90% de la producción. Por lo general, esta fracción gruesa se ajusta a los requerimientos que exigen las normativas vigentes quedando enmarcada dentro de los husos granulométricos de referencia establecidos en ellas. La fracción fina se caracteriza por presentar un elevado contenido de mortero influyendo negativamente en las propiedades del hormigón. En áridos naturales la EHE admite un 10% de desclasificados inferiores. Para áridos reciclados dicho porcentaje debe ser menor debido a los efectos perjudiciales que ocasionan en las propiedades del hormigón. El porcentaje de desclasificados inferiores en áridos reciclados establecido por el anejo 15 de la EHE 08 tiene

como límite el 10% debiendo ser el contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm no superior al 5%. Esta última especificación coincide con las especificaciones de Hong Kong y con las recomendaciones Rilem. La norma inglesa establece el límite de finos en el 5% cuando el árido reciclado proviene exclusivamente de hormigón, reduciendo dicho valor al 3% si el árido reciclado proviene de material cerámico o mezcla de ambos. La norma alemana establece la limitación de la cantidad de finos en el 4%. La norma belga establece la cantidad límite de finos en el 5% si los áridos reciclados tienen su origen en residuos cerámicos. (Calderón, 2014)

1.4.2 Densidad

La densidad de los AR es inferior a la de los convencionales. En general, esto se debe a la menor densidad del mortero adherido a las partículas de AR. Sin embargo, la influencia de la calidad del hormigón de origen es mínima en la densidad de los áridos que se obtienen. Las fracciones finas son, en general, las que presentan menores densidades debido a que contienen una mayor cantidad de pasta de cemento adherida. (Fonteboa, 2002)

Según bibliografías consultadas la densidad se encuentra generalmente en el rango de 2 100 y 2 600 Kg/m³. La menor densidad de estos áridos está dada debido al alto nivel de porosidad que contienen los mismos.

1.4.3 Absorción

La absorción de agua es mucho mayor en los áridos reciclados que en los correspondientes originales convencionales. Ello se debe a la enorme absorción que presenta el mortero adherido a los áridos originales. (Fonteboa, 2002)

La absorción de agua en áridos reciclados, según estudios realizados oscila entre 7 y 14 % por lo general, lo que significa una gran demanda de agua en comparación a un árido convencional el cual se encuentra en un rango de absorción de agua de 3 a 5 %. Esta demanda de agua afecta directamente las propiedades del hormigón a producir debido a que con una relación agua-cemento elevada la cantidad de poros en la mezcla también aumenta incidiendo de forma negativa en la resistencia mecánica del mismo.

1.4.4 Porosidad

Al igual que la absorción, la porosidad del árido reciclado presenta desventajas con respecto al árido natural debido a la doble composición que presenta: árido natural y mortero adherido. Estudios realizados han logrado, con el uso de separadores de densidad industriales,

seleccionar áridos reciclados procedentes de construcción y demolición con densidades superiores a $2,2 \text{ kg/dm}^3$, produciendo áridos con baja porosidad (menos del 17%, con un promedio del 6,7%), permitiendo la producción de árido reciclado con un buen rendimiento para la producción de hormigón. (Benedicto, 2011)

1.4.5 Forma y textura superficial

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. 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. (Calderón, 2014)

1.5 Propiedades del hormigón utilizando áridos reciclados

1.5.1 Hormigón reciclado en estado fresco

Las propiedades del hormigón en estado fresco utilizando árido reciclado difieren en cuanto a las propiedades del hormigón convencional principalmente en su consistencia y densidad. La demanda de agua del hormigón fresco reciclado es mayor que la del hormigón fresco hecho con áridos naturales y el consumo de cemento para la misma resistencia ligeramente superior.

1.5.1.1 Consistencia

La incorporación total de árido reciclado seco en el hormigón produce en general un aumento de la consistencia cuando se mantiene la misma relación agua/cemento. Como es bien sabido la absorción que presentan estos áridos es mayor que la de los naturales, se pueden obtener hormigones de consistencia fluida sin pre saturar los áridos y utilizando la misma cantidad de fluidificante que en un hormigón convencional. (Benedicto, 2011)

1.5.1.2 Densidad

Los valores de densidad del hormigón reciclado se encuentran entre los 2150 y los 2450 kg/m^3 , dependiendo del porcentaje de sustitución y de la densidad del árido reciclado. Comparado con el hormigón convencional, para sustituciones entre 0 y 50% de árido natural por reciclado se obtienen densidades entre 100 y 95%, mientras que para sustituciones de un 100% estos valores pueden llegar hasta un 85% de la densidad del hormigón patrón. (Benedicto, 2011)

1.5.1.3 Aire ocluido

Si bien 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%, la mayoría de ellos no presentan variaciones considerables. (Calderón, 2014)

1.5.2 Propiedades del hormigón con áridos reciclados en estado endurecido

1.5.2.1 Densidad

Según las bibliografías consultadas, la menor densidad del árido reciclado hace que la densidad del hormigón reciclado endurecido sea inferior a la del hormigón convencional. Con el reemplazo del 100% del árido grueso se pueden obtener valores de densidad de 10 al 20% menor. Así mismo con el reemplazo del 100% de árido grueso y árido fino entonces los valores de densidad van a ir disminuyendo de forma notable.

1.5.2.2 Resistencia a compresión

En general, la resistencia a compresión en los hormigones fabricados con árido reciclado disminuye con respecto a los convencionales, manteniendo en ambos la misma relación agua-cemento, siendo dicha disminución más significativa cuanto mayor sea el porcentaje de árido grueso sustituido. Las causas más influyentes en este aspecto son:

La cantidad de mortero adherido a la matriz rocosa que hace que el árido reciclado tenga una menor resistencia mecánica que el árido natural.

El aumento de zonas débiles en la masa de hormigón endurecido al utilizar áridos reciclados, ya que a la superficie de contacto entre el árido natural y el mortero adherido que lleva se suma la superficie de contacto, más débil aún, existente entre los áridos reciclados y el mortero nuevo.

Otro aspecto que influye directamente en la resistencia a compresión del hormigón reciclado es la calidad del hormigón de origen. Con un árido reciclado de baja calidad, procedente de un hormigón de baja resistencia o en mal estado, fabricaremos un hormigón reciclado cuya resistencia a compresión no superará la del hormigón original ni reduciendo la relación agua-cemento. Por el contrario, si los áridos reciclados proceden de hormigones con una elevada calidad de hormigón de origen con resistencia elevada y en buen estado, el hormigón reciclado obtenido sustituyendo el árido grueso a partir de ellos podrá presentar resistencias incluso superiores a las del hormigón de control. (Calderón, 2014)

1.5.2.3 Resistencia a tracción

Algunos autores coinciden en que, en los hormigones con áridos reciclados que sustituyen las fracciones gruesas, se producen disminuciones de la resistencia tracción indirecta, las pérdidas pueden alcanzar valores del 10-20%. Cuando se sustituyen áridos gruesos y arenas los mismos autores coinciden en que la resistencia a tracción aumenta con sustitución del 50%AF+100%AG se constan aumentos del 20-30%. (Fonteboa, 2002)

1.5.2.4 Resistencias a flexión

Cuando se sustituyen solo áridos gruesos no parecen existir diferencias con respecto a los hormigones que se producen con árido natural. Sin embargo, con sustituciones de árido fino y grueso la resistencia a flexión comienza a disminuir notablemente. Según (Fonteboa, 2002) con sustituciones del árido fino del 50% obtienen caídas de dicha resistencia del 15%. Con sustituciones tanto de la fracción gruesa como de la fina la carga última de rotura a flexión es un 30% inferior.

1.5.2.5 Resistencia a cortante

La disminución de la resistencia a cortante, según los estudios consultados, alcanzan el 26% cuando se sustituye únicamente el árido grueso. Dichas pérdidas alcanzan el 41% cuando la sustitución también se realiza en el árido fino. Otros autores establecen que sustituciones por debajo del 25% del árido grueso apenas afectan a la resistencia a cortante de elementos estructurales fabricados con áridos reciclados. Otros estudios establecen un buen comportamiento a cortante del hormigón reciclado con sustituciones del 50% del árido grueso. (Calderón, 2014).

1.5.2.6 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del hormigón reciclado es siempre inferior (entre un 15 y un 40%) al del hormigón de referencia y alcanza los valores menores cuando se utiliza también árido fino reciclado. (Gutiérrez, 2008)

Según (Benedicto, 2011) Los aridos reciclados en un nuevo hormigón, por lo general conducen a un menor módulo de elasticidad en comparación con los áridos naturales. Este hecho se debe a la mayor cantidad de fallas y microgrietas presentes entre el antiguo mortero y la grava, generadas durante el proceso de trituración, así como a la disminución de la media de tamaño de los AR debido a la ruptura de estos en el proceso de fabricación.

1.5.2.7 Fluencia

El hormigón reciclado presenta mayor fluencia que el hormigón de control fabricado con árido natural, debido principalmente al menor módulo de elasticidad del mortero que incorpora el árido reciclado. Cuando se utiliza 100% de árido reciclado, algunos autores han obtenido resultados más favorables entre 30-60%, mientras otros han obtenido resultados más favorables comprendidos entre 20-30%. (Juan, 2004)

1.6 Ventajas del uso de áridos reciclados

- Reutilización de los escombros mitigando impactos medioambientales.
- Económicamente viable al reutilizar recursos que ya han cumplido sus funciones.
- Disminución del número de escombros a depositar en los diferentes vertederos.
- Se reduce la explotación de canteras no siendo esta la única opción viable para obtener la materia prima indispensable en la fabricación de hormigón.

1.7 Desventajas

- Generación de polvo, ruidos, y vibraciones producidas en las operaciones de tamizado y machaqueo en las plantas de procesamiento de los áridos, por lo que hay que estudiar el emplazamiento más conveniente para reducir en lo posible su impacto ambiental. En el caso de plantas fijas de reciclaje de áridos es conveniente situarlas en las proximidades de una planta de fabricación de hormigón.
- Posibles impactos sobre la salud, causados por el inadecuado manejo y protección frente a componentes peligrosos que pueden existir en los residuos.
- Inciden sobre el medio ambiente de forma desfavorable producto al medianamente complejo proceso de trituración.
- Elevada absorción de agua, la que afecta directamente a la resistencia del hormigón.

1.8 Encapsulación del árido reciclado

Una de las alternativas que se toma para corregir el problema de absorción de agua es el encapsulamiento del material, el cual consiste en colocar una fina capa de cemento hidratado que rellene los poros que quedan en el material tras el proceso de machaqueo y triturado del árido.

El material reciclado de edificios antiguos contiene mortero como un componente que causa una alta porosidad. Como resultado, la absorción de agua es muy alta y la relación agua-cemento aumenta enormemente. Sin embargo, este valor debe mantenerse bajo. Para

conseguir una relación agua-cemento baja, se recubrió la fracción intermedia. La película formada reduce la absorción de agua y asegura una alta resistencia y durabilidad del hormigón. Además, la cantidad de cemento para la encapsulación tiene que disminuir para hacer que el hormigón sea más durable. (Petersen, 2015)

1.9 Situación a nivel mundial de los RCD

En la actualidad, los áridos reciclados se destinan a aplicaciones que no requieren un alto nivel de calidad, pero la evolución creciente del desarrollo tecnológico de su procesado y de su control de calidad permitirá en un futuro próximo alcanzar un nivel equiparable con los áridos naturales. Por tanto, el reciclado ha de incentivarse tomando medidas adecuadas que canalicen su empleo, regulando y controlando su calidad. (Muñoz, 2012)

Según el artículo (Anon., 2006) la situación europea es la siguiente:

- a) Holanda, Bélgica y Dinamarca superan la cifra del 90% de reciclaje para la fracción de hormigón, ladrillos, tejas etc., dentro de la corriente básica de RCD, y en concreto, Holanda y Bélgica, mantienen este altísimo grado de reciclaje para el resto de las fracciones que componen la corriente de residuos básica, reciclando también el 100% del asfalto procedente del residuo de construcción de carreteras. Este elevado porcentaje de reciclaje se debe principalmente, a la escasez de materias primas para la obtención de áridos vírgenes, y la dificultad de encontrar emplazamientos para vertederos, unidas a otras medidas de carácter legal y económico.
- b) Finlandia, Austria y el Reino Unido reciclan el 40-45% de los residuos básicos de construcción y demolición y entre el 50-76% (Austria y Finlandia) de la corriente de hormigón, ladrillos, tejas etc. 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).
- c) Suecia, Alemania y Francia el 15-20% de los residuos básicos de construcción y demolición. La baja cuota de reciclaje en Alemania contrasta con el elevado número de machacadoras operativas que hay en este país (1.000 con capacidad media de triturar 120.000T/año). Lo contrario sucede con los datos para el Reino Unido, donde se estiman solamente entre 50-100 machacadoras y sin embargo reciclan en torno al 45% de los RCD.

- d) Italia e Irlanda reciclan entre el 6 y 9% de los RCD y están impulsando el reciclaje de estos residuos.
- e) Finalmente, Portugal, Grecia y España presentan una situación de reciclaje de RCD que puede calificarse de marginal.

En nuestra capital, de acuerdo con estudios de viabilidad realizados entre el 2006 y el 2008, las cifras de producción de RCD son elevadas, alcanzando valores alrededor de los 1.170 m³ diarios, de los cuales el 5% corresponden a los residuos de hormigón. En un año pueden estar alrededor de los 15.000 m³. Este residuo proviene de la demolición selectiva de edificaciones en mal estado (35%), de empresas constructoras (50%) y plantas de prefabricados (10%). (E. Pavón(*), 2012)

1.10 Experiencias mundiales de uso de hormigón con áridos reciclados

Puente de Marina Seca del Fórum 2004 de Barcelona: Es 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), con una absorción media de 6,7%, exento de cloruros, y sulfatos. Más del 95% del árido reciclado eran partículas de hormigón. La cantidad de finos inferiores a 0,063 mm fue del 1% y el aporte de finos menores de 4 mm fue del 10%, lo que obligó a una ligera corrección en la cantidad de arena. Se utilizó una sustitución del 20% de árido reciclado previamente pre saturado, con un grado de saturación entre el 80% y el 90%. La resistencia obtenida fue de 47,8 N/mm², y los resultados de los ensayos de penetración de agua fueron adecuados. La puesta en obra de este hormigón tampoco presentó ninguna dificultad.

Países Bajos: En 1988 se empleó aproximadamente 500 m³ de hormigón reciclado en la construcción de los estribos de un viaducto en la carretera RW 32 cerca de Meppel. En 1990 se construyó un segundo viaducto en esa misma zona. En este caso se utilizó árido grueso reciclado (en un porcentaje del 20%) para todas las partes de hormigón del viaducto. La cantidad total de hormigón reciclado que se usó fue de 11.000 m³. En las obras de la compuerta del puerto en las proximidades de Almelo (en 1988) se emplearon unas 2.000 t de hormigón reciclado 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.

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.

Alemania: Se usó árido reciclado 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. (Gutiérrez, 2008)

1.11 Conclusiones parciales del capítulo.

El reciclaje constituye un paso de avance en la disminución del impacto ambiental que se produce en la construcción, representando una fuente de materia prima para las nuevas edificaciones en estos tiempos donde cada vez se van explotando aún más los recursos no renovables provenientes de la tierra.

El proceso de machaqueo y trituración de los áridos reciclados afectan las propiedades del mismo, obteniendo gravas con una elevada porosidad lo cual resulta desfavorable debido a que absorben grandes cantidades de agua disminuyendo las propiedades mecánicas del hormigón.

Estudios realizados demuestran que cuando se sustituye hasta un 25 % de árido natural por árido reciclado no se producen diferencias significativas a las de un hormigón convencional. Sin embargo, a medida que se aumenta el empleo de este árido la resistencia mecánica del hormigón comienza a disminuir de manera considerable.

Capítulo 2: Diseño y elaboración de las mezclas de hormigón con áridos reciclados.

2.1 Introducción al capítulo.

El presente capítulo tiene como objetivo la caracterización y procesamiento de las materias primas que se utilizan para la fabricación de hormigón reciclado. Se realiza una detallada descripción del proceso de encapsulación del material para aumentar la resistencia a compresión del hormigón, lo cual es el objetivo principal de la investigación.

Para lograr el cumplimiento de este capítulo se transitó por varias etapas, comenzando por el procesamiento (trituration) de la materia prima con el objetivo de obtener las tres fracciones de áridos que se necesitarán, se realizó la caracterización de los áridos, utilizando la norma cubana, se encapsuló la fracción intermedia del árido reciclado para luego producir hormigón con áridos encapsulados y sin encapsular con el objetivo de demostrar la eficiencia de este procedimiento.

2.2 Selección de escombros que conforman los áridos reciclados.

El material se recogió en la Empresa de Prefabricado “Luis Ramírez López” de Santa Clara, Villa Clara. Este material es depositado en un vertedero que se encuentra en la propia planta y para seleccionarlo se tuvo en cuenta que todo el material se escogiera de la misma zona para que no presentara variación las características de los mismos.

2.3 Molienda y trituración de los áridos reciclados.

Después de la recogida del material fue trasladado a una fábrica de bloques ubicada en la localidad de Agabama en el municipio de Fomento de la provincia de Sancti Spiritus, donde se llevaría a cabo la molienda del material obteniéndose así las tres fracciones de áridos requeridas.



Fig.2.1 Árido fino (0-5 mm) Fig.2.2 Árido grueso (5-9 mm) Fig.2.3 Árido grueso (9-19 mm)

Para la trituración fue necesario fragmentar los bloques de hormigón en trozos más pequeños para su molienda en un molino de mandíbula mecanizado. Se introduce en una tamizadora para obtener las tres fracciones correspondientes. Luego se realiza un segundo proceso de tamizado manual con el objetivo de extraer las fracciones que excedan los 19 mm.



Fig. 2.4 Tamizadora

2.4 Caracterización de los materiales a emplear.

2.4.1 Aditivo

El aditivo a utilizar es el Dynamon SX 32 ya que por sus propiedades es un superplastificante para hormigones de alta calidad con una reducida pérdida de trabajabilidad. Es un aditivo a base de polímeros acrílicos no sulfonados, exento de formaldehído. Le permite al hormigón reducir notablemente el agua de amasado. Estos hormigones de fácil puesta en obra en estado fresco y de elevadas prestaciones mecánicas en estado endurecido. Se aplica mayormente a hormigones de alta resistencia mecánica, impermeables y de alta durabilidad. Debido a su elevada reducción de agua y su capacidad de conservar la trabajabilidad es un aditivo superfluidificante idóneo para hormigones destinados a obras de impermeabilización en

presencia de agentes agresivos además de hormigones con una alta conservación de la trabajabilidad por tiempos de transporte superiores a 1 hora y temperaturas superiores a 25°C. Consiste en una solución acuosa al 22.1% de polímeros acrílicos, exenta de formaldehído, capaz de dispersar eficazmente los gránulos del cemento con componentes secundarios que mejoran notablemente la cohesión y la facilidad de bombeo del hormigón.

2.4.2 Áridos naturales

Los ensayos a los áridos naturales se realizaron en el laboratorio de materiales de la facultad de construcciones. Estos materiales son procedentes de las canteras del Purio.

Tabla 2.1 Resultados de los ensayos material: 19.0- 9.50 mm

Ensayos	Resultado	Según NC251:2013
Material más Fino que 0.074 mm (%)	2.4	≤ 1.0
Pesos Específicos Corriente	2.44	≥ 2.50
Pesos Específicos Saturado	2.51	
Pesos Específicos Aparente	2.6	
Absorción (%)	2.53	≤ 3.0
Masa Volumétrica Suelta (kg/m ³)	1452.801	
Masa Volumétrica Compactada (kg/m ³)	1579.927	

Tabla 2.2 Análisis Granulométrico fracción: 19.0- 9.50 mm.

Tamiz No						
	25	19	12.5	9.5	4.75	2.36
	mm	mm	Mm	Mm	Mm	mm
%Pasado	100	95	53	30	11	
NC 251:2013	100	90-100	20-55	0-15	0-5	

Observaciones: El material no cumple con la NC 251: 2013 Áridos para Hormigones Hidráulicos – Requisitos.

Tabla 2.3 Resultados de los ensayos material: 9.50 - 4.76mm.

	Resultado	Según NC251:2013
Material más Fino que 0.074 mm (%)	5.3	≤ 1.0
Pesos Específicos Corriente	2.39	2.5
Pesos Específicos Saturado	2.46	
Pesos Específicos Aparente	2.6	
Absorción (%)	3.03	≤ 3.0
Masa Volumétrica Suelta (kg/m ³)	1401.91	
Masa Volumétrica Compactada (kg/m ³)	1577.251	

Tabla 2.4 Análisis Granulométrico fracción: 9.50 - 4.76mm.

Tamiz No						
	25	19	12.5	9.5	4.75	2.36
	mm	mm	Mm	mm	mm	mm
% Pasado			100	98	46	18
NC251:2013			100	85-100	15-35	0-10

Observaciones: El material no cumple con la NC 251: 2013 Áridos para Hormigones Hidráulicos – Requisitos.

Material: 4.76 - 0.147m

Tabla 2.5 Resultados de los ensayos material: 4.76 - 0.147m.

Ensayos	Resultado	Según NC251:2013
Material más Fino que 0.074 mm (%)	4.3	≤ 3.0
Pesos Específicos Corriente	2.4	2.5
Pesos Específicos Saturado	2.48	
Pesos Específicos Aparente	2.61	
Absorción (%)	3.33	≤ 3.0
Masa Volumétrica Suelta (kg/m ³)	9	
Masa Volumétrica Compactada (kg/m ³)	1614.854	

Tabla 2.6 Análisis Granulométrico fracción: 4.76 - 0.147m.

Tamiz No							
	9.5	4.75	2.36	1.18	600	300	150
	mm	mm	Mm	mm	μm	μm	μm
%Pasado	100	99	67	48	28	13	4
NC251:2013	100	90-100	70-100	45-80	25-60	10-30	10-30

Observaciones: El resultado de T 200 para ambientes agresivos no debe exceder de 3% y para otros hormigones no debe exceder de 5%

2.4.3 Áridos reciclados

Para lograr una correcta caracterización de los áridos reciclados a utilizar en la fabricación de hormigón se deben realizar los ensayos de laboratorios correspondientes apoyándonos en la norma cubana. Estos ensayos son los siguientes: Análisis granulométrico (NC 178:2002) Peso Volumétrico (NC 181:2002) Peso Específico y Absorción de agua (NC 186 y 187:2002) y Tamiz 200 (NC 182:2002).

2.4.3.1 Granulometría

Para el análisis granulométrico los aparatos y utensilios son: estufa, balanza, vibrador mecánico de tamices y juego de tamices de agujeros cuadrados. Primeramente, se obtiene una muestra representativa del material, con el proceso de cuarteo del mismo se obtiene la muestra para el ensayo. El peso de las mismas para cada fracción se especifica en la NC 178:2002. Antes de comenzar el ensayo se deben secar en la estufa la muestra a una temperatura de 105°C a 110°C. La operación de tamizado se llevará a cabo por medio un movimiento lateral y vertical del tamiz acompañado de una acción de sacudida, luego se corrige a través de un tamizado manual para obtener así una mayor eficiencia del ensayo, se pesa en una balanza el material retenido en cada tamiz y lo que pasa hasta el fondo. Los porcentajes se calculan sobre la base del peso total de la muestra, incluido el material retenido en el fondo.

Muestra: 586.4 g.

Tabla 2.7 Ensayo granulométrico fracción: 0-5 mm.

Tamiz (mm)	9.5	4.75	2.36	1.18	0.59	0.297	0.149	Fondo
Retenido (g)	0	39.2	172.4	83.8	92.4	73.7	52.2	71.8
Pasado (%)	100	93.32	63.92	49.62	33.87	21.3	12.4	

Muestra: 1284.4 g.

Tabla 2.8 Ensayo granulométrico fracción: 5-9 mm.

Tamiz (mm)	12.7	9.5	4.75	2.36	1.19	Fondo
Retenido (g)	0	120.9	1099.5	44	7.3	12.6
Pasado (%)	100	90.59	4.98	1.56	0.99	

Muestra: 1304.5 g.

Tabla 2.9 Ensayo granulométrico fracción: 9-19 mm.

Tamiz (mm)	25.4	19.1	12.7	9.52	4.76	Fondo
Retenido (g)	0	0	854.2	389.1	51.8	9.8
Pasado (%)	100	100	34.52	4.69	0.72	

2.4.3.2 Peso volumétrico:

Para la realización de este ensayo disponemos de una varilla de compactación, balanza, estufa y recipientes calibrados el recipiente a utilizar en cada fracción depende del tamaño máximo de la misma como se especifica en la NC 181: 2002

Determinación del peso específico compactado:

Se procede a llenar el recipiente en tres capas, dándoles 25 golpes con la varilla de compactación a cada una de ellas, estos golpes serán distribuidos uniformemente. Luego se enrasa la superficie del árido de forma tal que el recipiente quede nivelado y se procede a pesar el recipiente en la balanza.

Determinación del peso específico suelto:

Se debe llenar el recipiente hasta desbordarse por medio de una pala o cuchara, seguido de este procedimiento se debe enrasar la superficie del recipiente de forma tal que quede totalmente nivelado, luego pesar en la balanza.

Método de cálculo:

PV suelto= Peso neto X factor de calibración

PV compactado= Peso neto X factor de calibración

Tabla 2.10 Peso Volumétrico fracción: 0-5 mm.

Arena 0-5 mm									
Recipiente: 5 litros					Factor de calibración =			0.2058	
1	Peso suelto	=	5231.5 g		1	Peso compactado	=	5656.7 g	
2	Peso suelto	=	5294.4 g		2	Peso compactado	=	5695.8 g	
Promedio			=	5262.95 g	Promedio			=	5676.25 g
PV suelto [kg/m³]			=	1083.12	PV compactado [kg/m³]			=	1168.17

Tabla 2.11 Peso Volumétrico fracción: 5-9 mm.

Árido grueso 5-9 mm									
Recipiente: 5 litros				Factor de calibración =				0.2058	
1	Peso suelto	=	5520.4 g	1	Peso compactado	=	5890.5 g		
2	Peso suelto	=	5564.5 g	2	Peso compactado	=	5872.6 g		
3	Peso suelto	=	5432.6 g	3	Peso compactado	=	5875.4 g		
4	Peso suelto	=	5569.5 g	4	Peso compactado	=	5950.9 g		
Promedio =				Promedio =				5897.35 g	
PV suelto [kg/m³] =				PV suelto [kg/m³] =				1213.67	

Tabla 2.12 Peso Volumétrico fracción: 9-19 mm.

Árido grueso 9-19 mm									
Recipiente: 20 litros				Factor de calibración =				0.04879	
1	Peso suelto	=	23644.6 g	1	Peso compactado	=	24376.7 g		
2	Peso suelto	=	23566.0 g	2	Peso compactado	=	24484.7 g		
Promedio =				Promedio =				24430.7 g	
PV suelto [kg/m³] =				PV suelto [kg/m³] =				1191.97	

2.4.3.3 Tamiz 200

Para la realización de este ensayo necesitamos de una estufa, bandeja metálica tamices 200 (0.074 mm) y otro con abertura mayor de 1.19 mm. Primeramente se prepara la muestra comenzando con un proceso de homogenización de la misma, evitando perder ninguna porción fina, se pone en un recipiente y se seca en la estufa a temperatura de 105°C a 110°C. El peso de la muestra se especifica en la NC 182: 2002. Después de pesar la muestra se coloca en la bandeja metálica y se le añade agua hasta cubrirla completamente mezclándola sin que se produzcan perdidas del material. Se vierte el agua que contiene las partículas en suspensión en los dos tamices colocando el tamiz más grueso encima del más fino para evitar el contacto de partículas grandes con el tamiz 200. El proceso de lavado se realiza hasta que el agua salga completamente limpia. El material retenido en los tamices se une a la muestra lavada se procede a secar a temperatura de 105°C a 110°C. Luego se pesa el material en la balanza.

Método de cálculo:

$$\% \text{ pasa tamiz 200} = \frac{A-B}{A} \times 100$$

Tabla 2.13 Tamiz 200 fracción: 0-5 mm.

A =	Peso de la muestra original seca				560.3 g
B =	Peso de la muestra seca después de lavada				534.2 g
	Porcentaje del material que pasa por el tamiz #200				4.66

Tabla 2.14 Tamiz 200 fracción: 5-9 mm.

A =	Peso de la muestra original seca				599.6 g
B =	Peso de la muestra seca después de lavada				595 g
	Porcentaje del material que pasa por el tamiz #200				0.77

Tabla 2.15 Tamiz 200 fracción: 9-19 mm.

A =	Peso de la muestra original seca				2704.7 g
B =	Peso de la muestra seca después de lavada				2685.6 g
	Porcentaje del material que pasa por el tamiz #200				0.71

2.4.3.4 Peso Específico y Absorción de Agua

Arena

Mediante este ensayo se obtienen los pesos específicos y la absorción de agua a partir del pesaje de la arena en estado seco y saturado en agua. Para ello se necesita una balanza, un frasco volumétrico de 500 ml de capacidad, un molde metálico en forma de cono truncado, varilla de compactación, secador de arena y estufa. Primeramente, se obtiene a través del cuarteo 1kg de la muestra colocándola en una bandeja, se seca en la estufa a temperatura de 105°C a 110°C se rellena con agua y se deja en estado saturado durante 24 horas. Luego se

seca la muestra con un secador de aire caliente de forma uniforme hasta que este seco superficialmente. Se comprueba que la muestra se encuentre en este estado a través del molde metálico, el cual se rellena y luego se le aplican 25 golpes con la varilla de compactación, si al levantar el molde la muestra se queda con la forma del molde es porque aún no ha llegado al estado de saturado y seco superficialmente y se continua con el proceso de secado. Se introduce la muestra en el frasco volumétrico y se añade agua hasta un pequeño espacio por debajo de la marca del enrase, se eliminan las burbujas que estén contenidas en el mismo y se le añade agua hasta que esta se encuentre en la marca del enrase del frasco y se determina su peso. Terminado este proceso se extrae la arena y se deseca en la estufa a temperatura de 105°C a 110°C, se deja enfriar a temperatura ambiente y se determina su peso.

Método de cálculo:

Peso Específico Corriente

$$PEC = \frac{A}{C+B-C1}$$

Peso Específico Saturado

$$PES = \frac{B}{C+B-C1}$$

Peso Específico Aparente

$$PES = \frac{A}{C+A-C1}$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{B-A}{A} \times 100$$

A – Peso en gramos de la muestra secada en la estufa

B – Peso en gramos de la muestra saturada con superficie seca

C – Peso en gramos del frasco lleno con agua

C1 – Peso en gramos del frasco con la muestra y agua hasta la marca del enrase.

Árido Grueso

En áridos gruesos se necesita para este ensayo balanza, estufa, cesto de alambre, recipiente para poder sumergir el cesto de alambre y un dispositivo para colgar el cesto en el centro de la balanza. Se comienza el ensayo seleccionando la muestra por el método de cuarteo, se lava

la misma de manera que se retire el polvo que esta contenga y se seca a temperatura de 105°C a 110°C, se sumerge en agua en un período de 24 horas. Se procede a secar la muestra con la ayuda de toallas absorbentes hasta que se encuentre seca superficialmente y se pesa en el aire, se introduce en el cesto metálico el cual se sumerge en agua y se pesa en este estado, se seca en la estufa a temperatura de 105°C a 110°C y se deja enfriar a temperatura ambiente para volverla a pesar en el aire.

Método de cálculo

Peso Específico Corriente

$$PEC = \frac{A}{B-C}$$

Peso Específico Saturado

$$PES = \frac{B}{B-C}$$

Peso Específico Aparente

$$PES = \frac{A}{A-C}$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{B-A}{A} \times 100$$

A – Peso en el aire de la muestra secada en estufa (g)

B – Peso en el aire de la muestra saturada y superficialmente seca (g)

C – Peso en el agua de la muestra saturada (g)

Tabla 2.16 Peso específico y absorción de agua fracción: 0-5 mm.

Arena 0-5 mm							
Fecha:	10/03/2017	15/03/2017	15/03/2017	22/03/2017	arena 2016		
A	413.2	425	423.1	453.1			
B	500	500	500	500			
C	619.3	619	619	619			
C ₁	873.8	883	883.6	894.7			
Fecha:				10/03/2017	15/03/2017	15/03/2017	promedio
PEC	(Peso específico corriente) =	1.68	1.80	1.80	1.80	1.80	2.02
PES	(Peso específico saturado) =	2.04	2.12	2.12	2.12	2.12	2.23
PEA	(Peso específico aparente) =	2.60	2.64	2.67	2.65	2.65	2.55
Absorción =		21.006776	17.647059	18.175372	17.91	10.350916	

Tabla 2.17 Peso específico y absorción de agua fracción: 5-9 mm.

Árido grueso 5-9 mm			
Fecha:	10/03/2017	Fecha:	10/03/2017
Peso específico corriente =	2.20		5013.1
Peso específico saturado =	2.37		5403.4
Peso específico aparente =	2.65		3119.8
Absorción =	7.79		

Tabla 2.18 Peso específico y absorción de agua fracción: 9-19 mm.

Árido grueso 9-19 mm			
Fecha:	13/03/2017	Fecha:	13/03/2017
Peso específico corriente =	2.21		5018.9
Peso específico saturado =	2.36		5366.8
Peso específico aparente =	2.61		3095.5
Absorción =	6.93		

2.4.3.5 Absorción de agua (10 min)

Este ensayo consiste en analizar la absorción de agua de cada fracción del material a emplear para la mezcla en el período de tiempo de 10 min con el objetivo de que el árido no absorba el agua de la mezcla. El procedimiento es el siguiente: se extraen 500g del material, se satura durante 10 min, luego se escurre el agua y se seca superficialmente con toallas y se vuelve a pesar.

Tabla 2.19 Absorción de agua (10 min)

Absorción de agua	10 min
0-5 mm	14.0
5-9 mm	3.3
5-9 mm con encapsulamiento	0.9
9-19 mm	5.3

2.5 Cemento

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

Tabla 2.20 Cemento P- 35. Resultado de ensayos mecánicos.

	Ensayos Mecánicos		
	3 días	7 días	28 días
Resistencia a compresión (MPa)	23,5	31,6	46,2

Tabla 2.21 Cemento P- 35. Resultado de ensayos físicos.

Ensayos Físico	Resultados	Según
		NC
Superficie Específica (cm ² /g)	3671	2800
Tiempo de Fraguado Inicial (min)	40	45

Tiempo de Fraguado Final (h)	5,79	
		10

Tabla 2.22 Cemento P- 35. Resultado de ensayos químicos.

Ensayos Químicos		
Ensayo	Resultados	Según NC
Pérdida por ignición (máx.) %	3,67	4,0
Residuo insoluble (máx.) %	5,79	4,0
Trióxido de Azufre (máx.) %	0,72	3,5

2.6 Diseño del plan experimental.

En la presente investigación se propone realizar un hormigón con 100% de áridos reciclados. El diseño experimental se obtuvo de la hoja Excel Toufar, esta diseña para un contenido mínimo de huecos.

Etapas del proceso

1ra Etapa: Diseño en Toufar

Este método combina las tres fracciones de 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.

Debido a que en 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.

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

Diferencia de fino de 140kg/m³ de Hormigón.

2da Etapa: Encapsulación del material 5-9mm.

La encapsulación consiste en agregar al árido reciclado de la fracción 5-9mm una fina capa de cemento hidratado con el objetivo de aumentar la resistencia a compresión del hormigón a producir con este tipo de árido. El objetivo principal es llegar a la mezcla óptima resultante de dos tipos de cemento (LC3 y PP-35) para dos cantidades del mismo (60 y 40) kg/m³ de hormigón.

3ra Etapa: Trabajo de laboratorio

A partir del diseño en el Toufar y de la mezcla óptima resultante de la encapsulación, se elaborarán las muestras necesarias para realizar los ensayos de resistencia a compresión a los 7 y luego 28 días. Para ello se utilizan los moldes cúbicos de 100 mm x 100 mm x 100 mm.

2.7 Encapsulación del material de 5-9 mm

Los áridos reciclados son más comúnmente utilizados con una variada sustitución del árido natural. A medida que aumenta el porcentaje en que se sustituye el árido convencional disminuyen las propiedades del hormigón. Debido a que está demostrado que las propiedades de un hormigón hecho en su totalidad con árido reciclado son muy bajas se decide encapsular la fracción 5-9 mm del material. Se realizó con una peletizadora ubicada en las instalaciones del Departamento de Ingeniería Mecánica en la UCLV.



Fig. 2.5 Peletizadora

El proceso consiste en colocar el material en el tambor giratorio con una inclinación de 30° que se encarga de mezclar el árido, este se satura con el objetivo de que no absorba luego el agua de la mezcla, se procede a rociar el cemento con la ayuda de un tamiz # 600 al mismo tiempo que se va hidratando el cemento hasta que este se haya agotado completamente. Luego se coloca el material resultante en sacos de nylon y se tapa con mantas húmedas que sean capaces de absorber y filtrar agua para que cumplan con el proceso de curado del material que se realiza cada 24 horas con una duración de 7 días.



Fig. 2.6 Curado del material encapsulado

2.7.1 Cálculo de la Encapsulación

Se realiza un análisis inicial donde se decide realizar la encapsulación con cemento PP-35 y LC3 cada uno con una cantidad de 60kg/m³ y 40kg/m³ de hormigón para luego obtener de esas variantes la mezcla óptima.

El cálculo del encapsulamiento se realizó a partir de la cantidad de cemento y la cantidad de árido que se obtienen del Toufar para cada m³ de hormigón.

Ejemplificaremos mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Proporción cemento/material}(60kg/m^3) = \frac{\text{cemento}(\frac{kg}{m^3})}{\text{Fraccion 5-9}(\frac{kg}{m^3})}$$

$$\text{Proporción cemento/material}(60kg/m^3) = \frac{60(\frac{kg}{m^3})}{425(\frac{kg}{m^3})} = 0.141$$

Se fija una cantidad de árido de 2.75 kg para cada encapsulación y para esta proporción se calculan los kilogramos de agua y cemento.

$$\text{Cemento} = 2.75 \text{ kg} * \text{Proporción cemento/material}(60kg/m^3)$$

$$\text{Cemento} = 2.75 \text{ kg} * 0.141 = 0.388 \text{ kg}$$

Para una relación agua/cemento = 0.5 se obtiene:

$$\text{Agua} = 0.5 * 0.388 \text{ kg} = 0.194 \text{ kg}$$

Para una cantidad de cemento de 40kg/m³ de hormigón se realiza el mismo proceso de cálculo. A continuación, se presenta una tabla resumen con las encapsulaciones realizadas.

Tabla 2.23 Encapsulación del material con LC3 y PP-35.

		Material 5-9 mm	cemento [g]	a/c calc.	agua calc.	agua calc. Antes [g]	agua calc. Después	agua usado	pomo sat. ante [g]	pomo sat. después	agua usado add. Saturar	agua total [g]	a/c real
LC ³	60 kg/m ³	2750	388	0.5	194	194	128.9	65.1	218.3	142.4	75.9	141	0.36
	40 kg/m ³	2750	259	0.5	129.5	129.5	97.3	32.2	210	114.2	95.8	128	0.49
P-35	60 kg/m ³	2750	388	0.5	194	194	148.8	45.2	198.9	96.4	102.5	147.7	0.38
	40 kg/m ³	2750	259	0.5	129.5	129.5	79.8	49.7	181.8	86.5	95.3	145	0.56

2.7.2 Determinación de la mezcla óptima

Luego de realizadas estas encapsulaciones y del proceso de curado del material durante siete días, se elaboraron las probetas cúbicas de 100 mm x 100 mm x 100 mm para realizar las pruebas de resistencia. En la siguiente tabla se muestra la resistencia a compresión del hormigón con áridos encapsulados a los siete días.

Tabla 2.24 Resultados de resistencia a compresión.

Serie	Fecha	$f_{c, \text{cube}(100 \text{ mm})}$ 7d
LC3-60	05/04/2017	9
		9
		9
LC3-40	05/04/2017	10
		9
		10
PP-35(60)	05/04/2017	-
		12
		12
PP-35(40)	05/04/2017	11
		10
		11

De la tabla anterior se concluye que la mejor encapsulación es la que se realiza con el cemento PP-35 y para 60kg/m^3 debido a que presenta mayores resultados de resistencia a compresión y además la relación agua/cemento es de 0.38 lo que resulta 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.

2.7.3 Cantidad de material a encapsular.

Después de tener la mejor encapsulación se volvió a encapsular el material necesario. Para ello se encapsularon cerca de 85 Kg de material, los cuales se distribuyeron en 31 encapsulaciones de 2.75 Kg cada una. Los resultados de la encapsulación se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.24 Cantidad de material encapsulado.

	Material(g) (5-9)	Agua Sat(g) (antes)	Agua Sat(g) (después)	Diferencia (g)	Agua mezclar(g) (antes)	Agua mezclar(g) (después)	Diferencia (g)	Total (g)	Cemento (g)	a/c
1	2750.0	218.9	111.7	107.2	165.3	125.2	40.1	147.3	388	0.380
2	2750.0	231.2	119.3	111.9	163.4	131.6	31.8	143.7	388	0.370
3	2750.0	218.2	130.4	87.8	174.6	126.9	47.7	135.5	388	0.349
4	2750.0	222.5	91.4	131.1	165.6	118.5	47.1	178.2	388	0.459
5	2750.0	210.5	105.8	104.7	175.5	135.4	40.1	144.8	388	0.373
6	2750.0	207.9	113.1	94.8	174.5	98.9	75.6	170.4	388	0.439
7	2750.0	221.2	101.6	119.6	168.1	125.0	43.1	162.7	388	0.419
8	2750.0	202.5	94.9	107.6	167.3	128.6	38.7	146.3	388	0.377
9	2750.0	223.3	113.0	110.3	165.6	124.5	41.1	151.4	388	0.390
10	2750.0	210.0	100.9	109.1	171.4	116.2	55.2	164.3	388	0.423
11	2750.0	221.6	106.8	114.8	172.8	122.9	49.9	164.7	388	0.424
12	2750.0	180.1	61.4	118.7	166.9	123.1	43.8	162.5	388	0.419
13	2750.0	211.8	98.2	113.6	183.3	124.5	58.8	172.4	388	0.444
14	2750.0	192.1	79.0	113.1	185.5	123.7	61.8	174.9	388	0.451
15	2750.0	183.5	57.7	125.8	166.8	112.0	54.8	180.6	388	0.465
16	2750.0	183.7	40.2	143.5	171.5	146.0	25.5	169.0	388	0.436

17	2750.0	212.4	83.3	129.1	175.2	138.2	37.0	166.1	388	0.428
18	2750.0	200.0	91.3	108.7	180.4	126.6	53.8	162.5	388	0.419
19	2750.0	214.9	77.2	137.7	179.0	152.4	26.6	164.3	388	0.423
20	2750.0	209.3	110.4	98.9	176.3	144.9	31.4	130.3	388	0.336
21	2750.0	210.6	109.3	101.3	175.3	132.5	42.8	144.1	388	0.371
22	2750.0	212.4	127.7	84.7	187.0	146.9	40.1	124.8	388	0.322
23	2750.0	215.2	84.5	130.7	184.7	145.6	39.1	169.8	388	0.438
24	2750.0	205.6	67.5	138.1	186.3	147.8	38.5	176.6	388	0.455
25	2750.0	216.5	86.7	129.8	190.8	162.5	28.3	158.1	388	0.407
26	2750.0	224.9	98.4	126.5	183.3	141.9	41.4	167.9	388	0.433
27	2750.0	212.3	88.1	124.2	184.8	141.4	43.4	167.6	388	0.432
28	2750.0	198.2	77.6	120.6	189.6	148.7	40.9	161.5	388	0.416
29	2750.0	209.6	88.7	120.9	179.4	147.2	32.2	153.1	388	0.395
30	2750.0	220.7	123.3	97.4	182.9	139.7	43.2	140.6	388	0.362
31	2750.0	213.1	97.1	116	173.8	129.1	44.7	160.7	388	0.414



Fig. 2.7 Material encapsulado.

2.8 Diseño de mezcla para la elaboración de hormigón.

En cada producción de hormigón se sigue el mismo procedimiento. El día previo a la elaboración de la mezcla se pesan 500g de cada fracción del árido a utilizar, seguidamente se pone a secar en la estufa durante 24 horas para volverlo a pesar y así controlar la humedad manteniendo el mismo valor de la relación agua-cemento.

Estos datos y los obtenidos del Toufar se introducen en la hoja de cálculo Excel Diseño de la mezcla de hormigón. Esta hoja de cálculo está diseñada para obtener los kilogramos de áridos en sus diferentes fracciones, agua para saturar y mezclar y el cemento que se necesita, tanto para el árido reciclado encapsulado como para el árido sin encapsular

2.8.1 Elaboración de hormigones.

Los hormigones fueron realizados en los laboratorios de materiales del CIDEM en la Facultad de Construcciones de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas y para ello se utilizó una mezcladora de eje basculante de 350 dm³ de capacidad.



Fig. 2.8 Mezcladora de eje basculante.

El procedimiento para elaborar el hormigón fue el siguiente:

Primeramente, se vierten los áridos en la mezcladora comenzando por el grueso, luego el intermedio y por último el árido fino, luego se saturan con un proceso de homogenización durante 2 minutos aproximadamente, se deja reposar durante 10 minutos manteniéndolos tapados para que no pierdan humedad, este proceso se realiza debido a que el árido reciclado tiene una elevada absorción de agua y si se saturan antes y se mantienen absorbiendo esta agua entonces no absorbería el agua de la mezcla y no varía así la relación a/c. Después de este período de tiempo se añade el cemento y el agua con el aditivo dejando mezclar durante 2 minutos aproximadamente. Se procede a medir la temperatura y a realizar el ensayo “Cono de Abrams” según la NC 174-2002 “Hormigón fresco. Determinación del asentamiento por el cono” donde se miden tres asentamientos en diferentes alturas.



Fig. 2.9 Asentamientos según “Cono de Abrams”.

2.8.2 Llenado de probetas, compactación y curado.

Se toma como referencia la NC-221-2002 “Hormigón. Elaboración de probetas para ensayos”

Se procede a preparar los moldes cúbicos de 100 mm x 100 mm x 100 mm cubriendo la parte interior de los mismos con aceite para facilitar el posterior desmolde de las probetas. Se introduce el hormigón en dos capas compactando cada una, se compensa la superficie, se tapa con nylon mientras se mantiene en la probeta por un período de 24 horas. Transcurrido este tiempo se extraen de los moldes y se marcan para introducirlas en la piscina de curado donde se mantienen hasta la realización del ensayo a compresión.



Fig. 2.10 Elaboración de probetas.

2.9 Ensayos al hormigón en estado endurecido.

Resistencia a compresión

La determinación de la resistencia a compresión se realizó en el laboratorio de ensayos (UCLV) con la prensa que existe en dicho establecimiento, y se realizó sobre probetas cúbicas de 100 mm x 100 mm x 100 mm. El proceso de rotura fue respetado y cumplido como lo indica la (NC, 244-2005). Se sacan las probetas fuera de la piscina de curado, cuidando que no pierdan humedad antes del ensayo por lo que este se debe realizar antes de pasadas 2 horas. La probeta se coloca cuidadosamente y la carga se aplica de forma continua y sin choques bruscos.



Fig. 2.11 Prensa.

2.10 Conclusiones parciales.

En la caracterización de la áridos reciclados se utilizaron las mismas normas vigentes para áridos naturales.

El proceso de trituración del material influye decisivamente en las propiedades de estos áridos, así como la cantidad de mortero adherido lo cual disminuye la resistencia mecánica del hormigón.

Para la encapsulación del material se hace necesario pre saturarlo con el objetivo de que este no absorba el agua de la mezcla de la capa, de esta manera las partículas adoptan una textura fina en su exterior, lo que resulta favorable en este procedimiento.

Capítulo 3: Análisis de los Resultados

3.1 Introducción

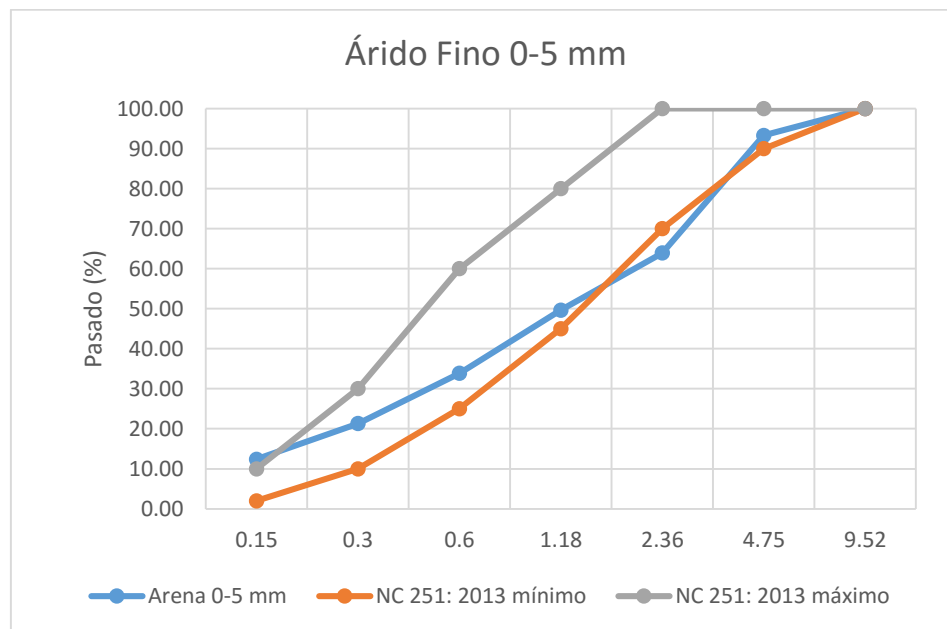
En este capítulo se muestran los resultados obtenidos a partir de la caracterización de los áridos, analizando su comportamiento y se comparan con la norma establecida para áridos naturales NC 251 “Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos”. Además, se determinaron las propiedades físico-mecánicas de los hormigones elaborados con estos materiales reciclados a partir de los valores de resistencia a compresión a los 7 y 28 días para de esta manera dar respuesta a la teoría planteada en la presente investigación.

3.2 Propiedades de los áridos reciclados

3.2.1 Análisis granulométrico.

En los gráficos siguientes se presentan las granulometrías de los áridos reciclados.

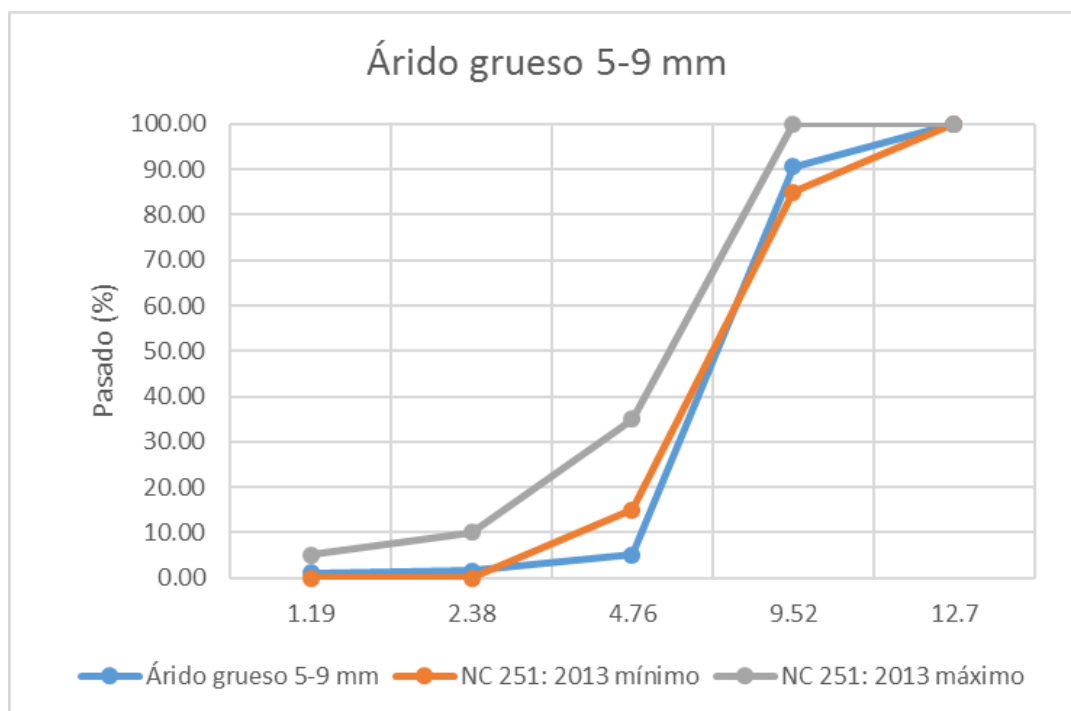
Gráfico 3.1 Resultados del análisis granulométrico fracción: 0-5 mm.



Como se aprecia en el gráfico 3.1 la arena cumple con los parámetros establecidos por la NC (251-2013) para áridos naturales excepto en el tamiz 2.36 mm donde el % Pasado se encuentra por debajo del límite inferior. En el tamiz 0.15 mm se observa que el % pasado es

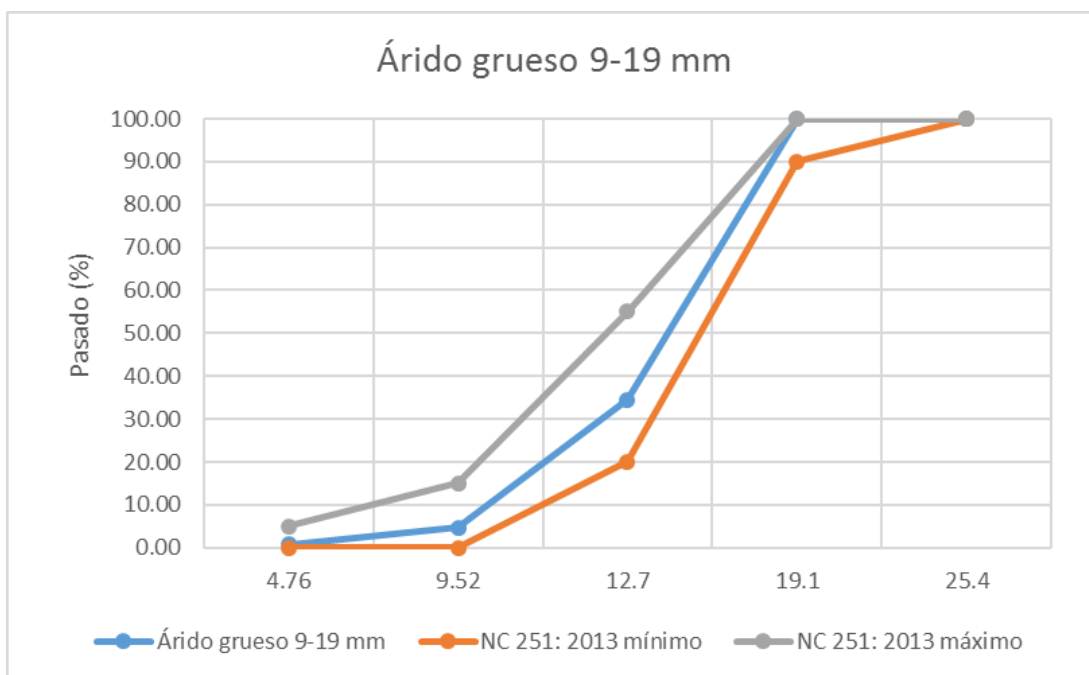
ligeramente mayor al especificado por norma lo que significa el contenido de fino en la arena es elevado en comparación con el árido natural producto al proceso de trituración y a la presencia de mortero adherido al árido original.

Gráfico 3.2 Resultados del análisis granulométrico fracción: 5-9 mm.



En el gráfico 3.2 se muestra que el árido grueso de la fracción 5-9 mm cumple con los parámetros establecidos por la NC (251-2013) para áridos naturales excepto en el tamiz 4.76 mm donde el % Pasado se encuentra por debajo del límite inferior.

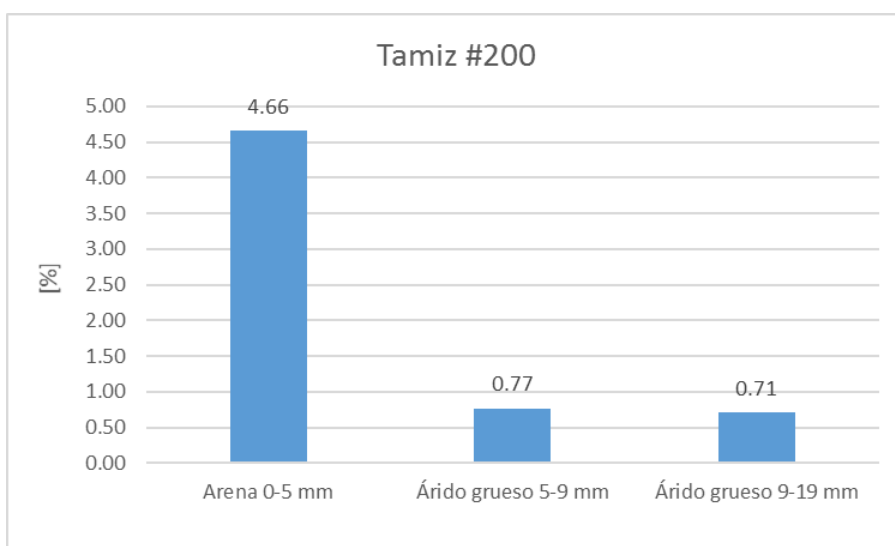
Gráfico 3.3 Resultados del análisis granulométrico fracción: 9-19 mm.



A partir del gráfico 3.3 se puede apreciar que el árido grueso de la fracción 9-19 mm cumple con los parámetros establecidos por la NC (251-2013) para áridos naturales.

3.2.2 Tamiz 200

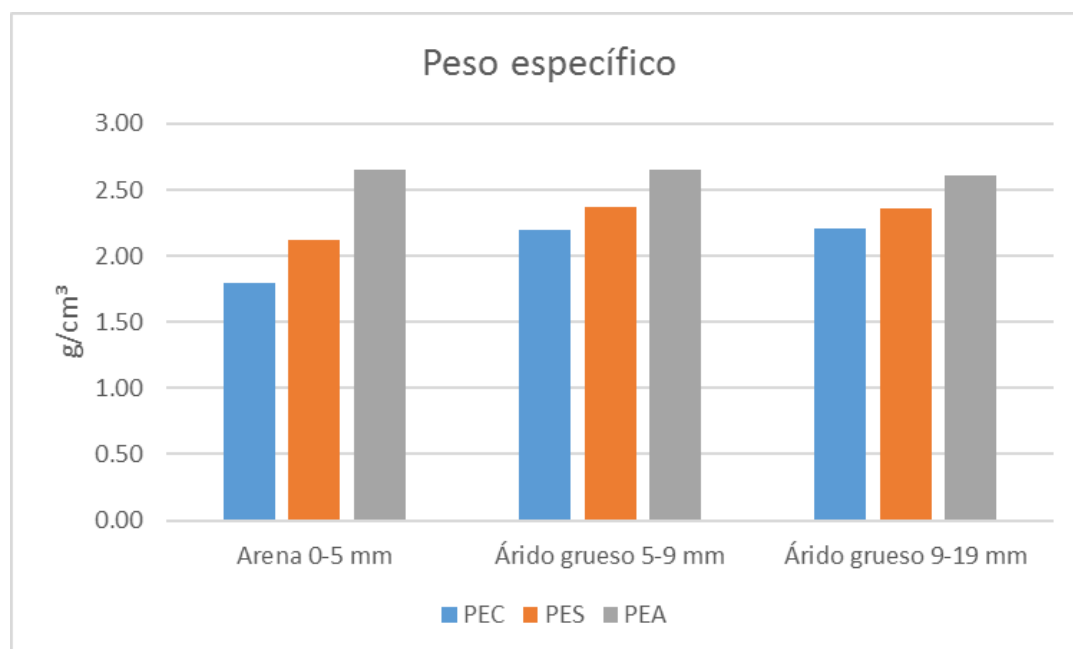
Gráfico 3.4 Resultados del ensayo Tamiz 200.



Según la (NC, 251-2013) el % de árido fino inferior al tamiz 200 tiene que ser menor que el 5 % para la arena y menor que el 1% para áridos gruesos y como se puede apreciar en el gráfico 3.4 los áridos finos reciclados cumplen con esta norma.

3.2.3 Peso Específico

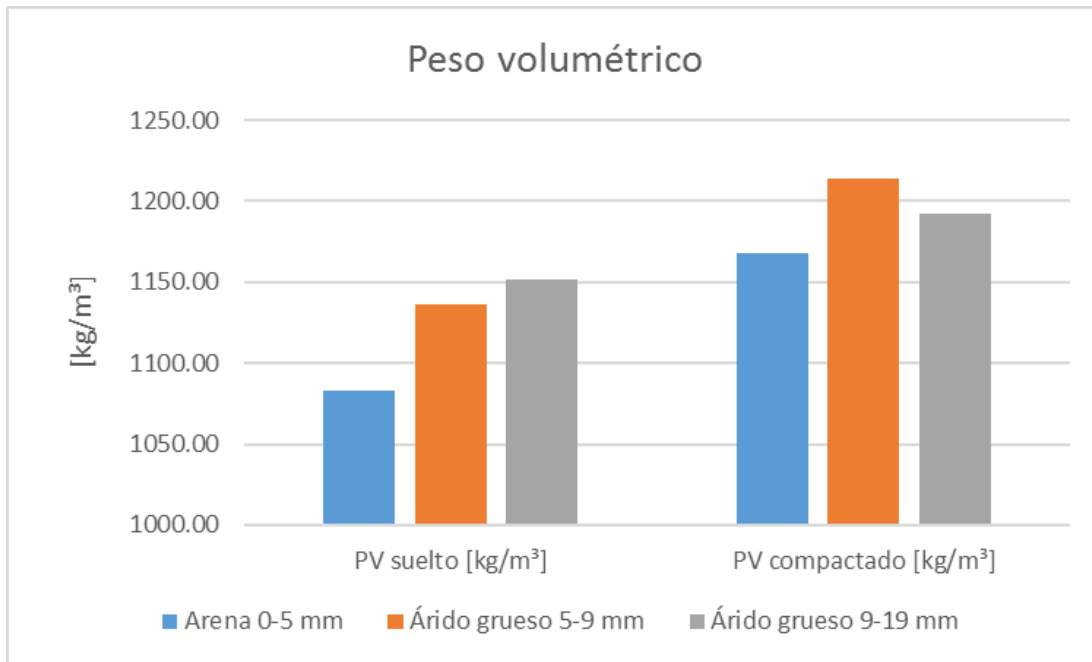
Gráfico 3.5 Resultados de los ensayos Peso específico y absorción de agua.



Según la norma cubana el peso específico corriente de los áridos debe ser mayor a 2.5 g/cm³ y como se aprecia en el gráfico 3.5 este parámetro no cumple para ninguna de las fracciones.

3.2.4 Peso Volumétrico

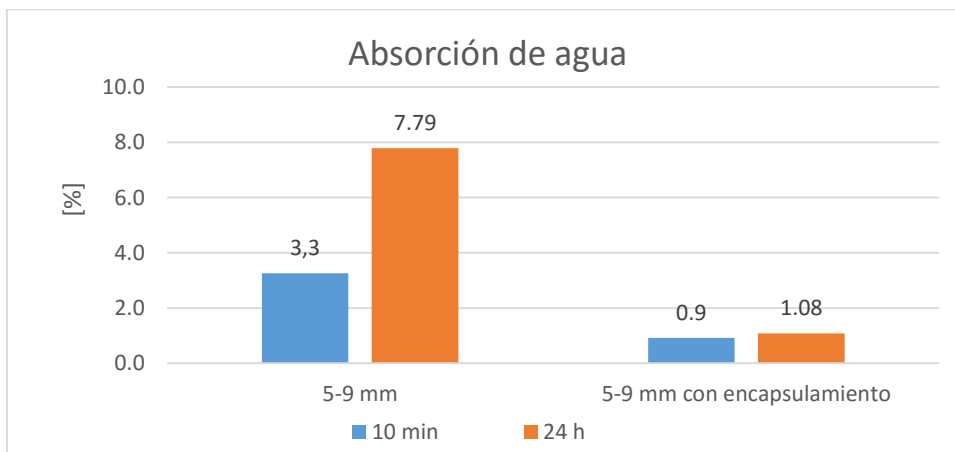
Gráfico 3.6 Resultados del ensayo Peso Volumétrico.



El Peso Volumétrico para áridos reciclados se encuentra por debajo de los áridos naturales. Según los ensayos realizados a los áridos naturales los valores de Peso volumétrico suelto se encuentran entre 1430 y 1452 kg/m³ el compactado entre 1579 y 1614 kg/m³.

3.2.5 Absorción de agua (10 min)

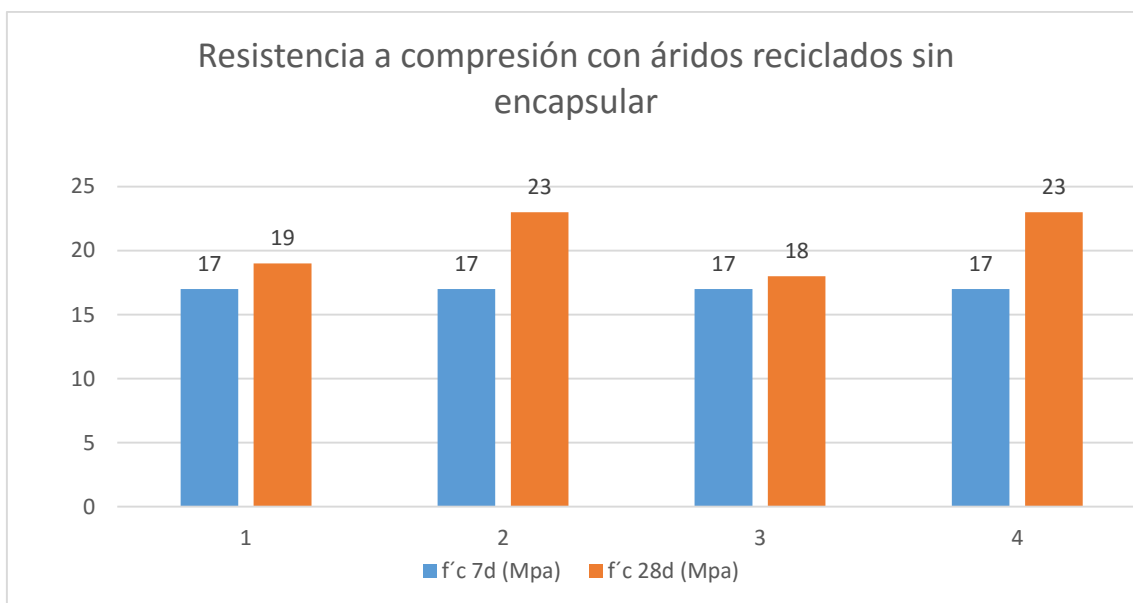
Gráfico 3.7 Resultados del ensayo Absorción de agua (10 min).



En el Gráfico 3.7 se realiza una comparación de la absorción de agua que contienen los áridos reciclados encapsulados y sin encapsular donde se demuestra que la encapsulación disminuye el porcentaje de absorción de agua en un 72 % para 10 minutos y en un 86 % para 24 horas.

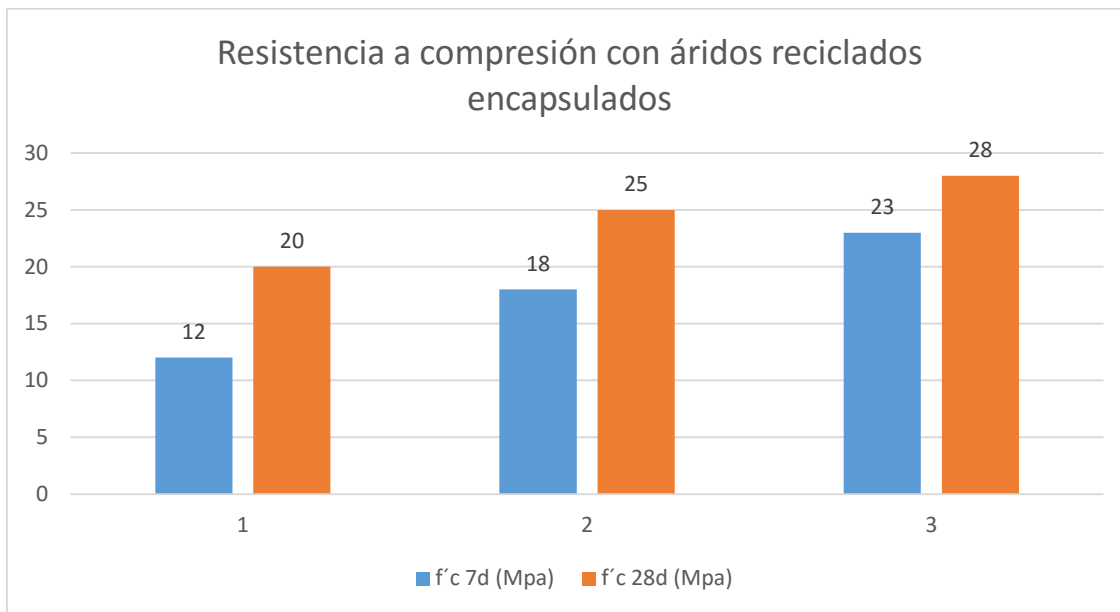
3.3 Ensayos del hormigón endurecido

Gráfico 3.8 Resultados Resistencia a compresión con áridos reciclados sin encapsular.



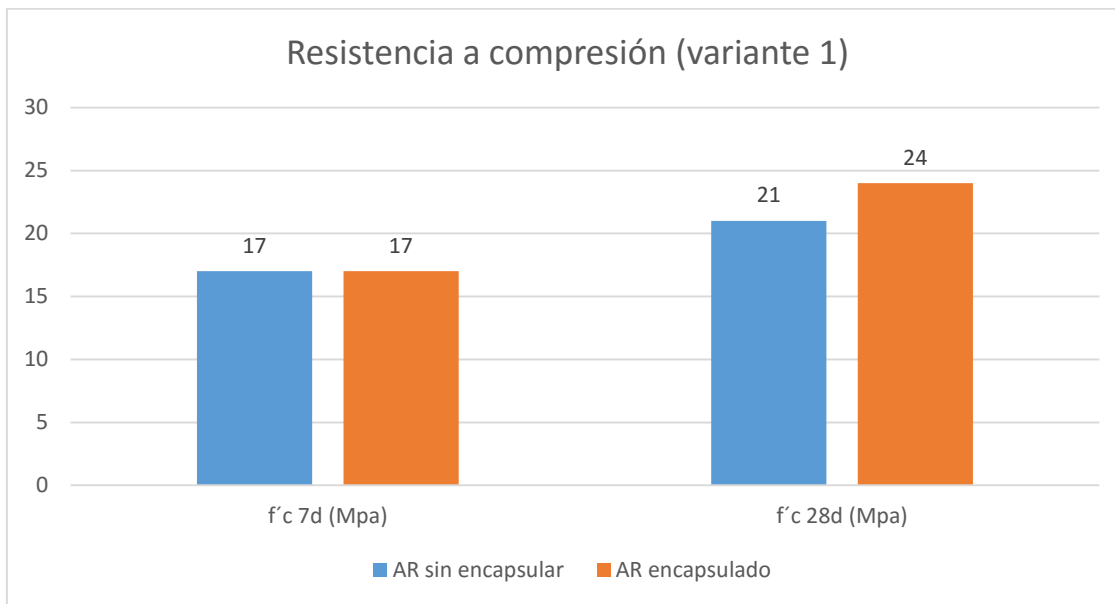
Como se aprecia en el gráfico 3.8 la resistencia compresión del hormigón con árido reciclado alcanza hasta 17 MPa a los 7 días. Las resistencias de los 28 días oscilan entre 18 y 23 MPa. En estos casos se demuestra que las propiedades de este hormigón no son muy favorables.

Gráfico 3.9 Resultados Resistencia a compresión con áridos reciclados encapsulados.



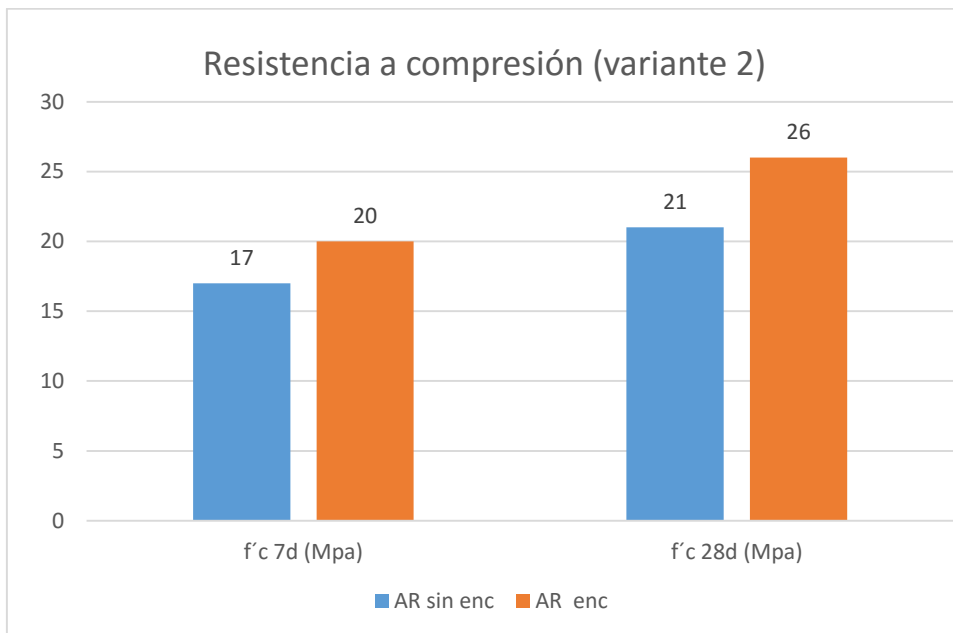
En el gráfico 3.9 se muestra la resistencia a compresión encapsulando la fracción intermedia de estos áridos. Se hace necesario explicar que la serie número uno resultó muy desfavorable en la mayoría de las pruebas de resistencia a compresión. Se plantea la teoría de que esto sucede debido a la constante humedad a la cual estuvo expuesta la arena, se observó que se estaba endureciendo y se fueron conformando grandes granos que no se mezclaron en su totalidad con cemento y esto forma una zona débil, más vulnerable al fallo. Sin embargo en las demás series se observa un aumento de la resistencia del hormigón alcanzado valores de hasta 28 MPa a los 28 días.

Gráfico 3.10 Resultados Resistencia a compresión con áridos reciclados encapsulados (variante 1).



En el Gráfico 3.10 se hace un análisis de los resultados de la resistencia de áridos encapsulados y sin encapsular tomando en cuenta los resultados obtenidos de la serie 1 para áridos encapsulados la cual pensamos que hayan existido problemas en la fabricación de ese hormigón, se demuestra mediante este gráfico que la resistencia de áridos encapsulados y sin encapsular se mantienen iguales a los 7 días, sin embargo, a los 28 días existe un aumento de la resistencia en un 17 %.

Gráfico 3.11 Resultados Resistencia a compresión con áridos reciclados encapsulados (variante 2).



En el gráfico 3.11 no tomamos en cuenta la serie 1 para áridos encapsulados por lo que se demuestra un aumento de la resistencia en un 15 % para 7 días y en un 20 % para 28 días cuando se encapsula la fracción intermedia de los áridos.

3.4 Conclusiones parciales.

1. Los áridos fueron comparados con la norma cubana para áridos naturales y con los resultados de los ensayos de los áridos procedentes del Purio ya que no existe una norma cubana para la utilización en la fabricación de hormigón de áridos reciclados.
2. En algunos casos como Tamiz 200 y Granulometría cumple en su mayoría según la NC 251, pero en el caso de la densidad, y absorción de agua no cumplen con los requisitos necesarios para la fabricación de hormigón por lo que pueden afectar las propiedades del mismo.
3. Los resultados obtenidos de resistencia a compresión a los 7 y 28 días demuestran un empleo satisfactorio de áridos reciclados encapsulados en la producción de hormigón estructural.

Conclusiones Generales

La constante utilización de áridos naturales en la construcción está generando el agotamiento de los mismos.

El reciclaje en el sector de la construcción resolvería en gran medida problemas ambientales y económicos.

El mortero adherido al árido natural y el proceso de trituración influyen negativamente en las propiedades de estos áridos, aportando afectaciones en cuanto a la granulometría y la densidad de los mismos. Su forma y textura porosa eleva el porcentaje de absorción de agua disminuyendo las propiedades físico-mecánicas del hormigón hidráulico.

La mezcla más adecuada para la encapsulación resulta ser la que se realiza con el cemento PP-35 y para 60 kg/m^3 debido a que presenta mayores resultados de resistencia a compresión y además la relación agua/cemento de la capa es de 0.38 lo que resulta favorable debido a que a una menor relación a/c existe un menor número de poros en la encapsulación.

Los ensayos demuestran que la encapsulación del material representa un procedimiento viable para aumentar la resistencia a compresión alcanzando aumentos de hasta un 20% aproximadamente en un hormigón compuesto por áridos reciclados, conformando una capa que impide considerablemente el paso del agua hacia los poros del árido reciclado, disminuyendo en un 70% la absorción de agua de la misma.

Recomendaciones

Realizar una Norma Cubana referente a la elaboración de hormigón utilizando áridos reciclados, donde se incluyan las diferentes especificaciones a tener en cuenta para lograr un hormigón con la calidad requerida para la utilización de estas materias primas.

Mantener un especial cuidado en el almacenamiento de estos áridos donde se evite el contacto con agua y otras exposiciones que afecten las propiedades de estos, ya que absorben gran humedad y esto puede provocar resultados no deseados en las propiedades del hormigón.

Seguir investigando en esta temática con el interés de obtener ventajas económicas con la utilización de áridos reciclados en la fabricación de hormigón hidráulico.

Bibliografía

Anon., 2006. *Residuos de Construcción y Demolición*. s.l.:s.n.

Anon., 2010. *Catálogo de Residuos de Construcción y Demolición*. España: s.n.

Baéz, A. d. G., 2010. *Estudio de las propiedades fundamentales de elementos prefabricados de hormigón no estructurales, con incorporación de árido reciclado en su fracción gruesa y fina*. Madrid: s.n.

Benedicto, J. Á. P., 2011. *Estudio experimental sobre propiedades mecánicas del hormigón reciclado con áridos procedentes de la no calidad en prefabricación*. Madrid: s.n.

Calderón, Á. N., 2014. *Uso y Fomento del Árido Reciclado en Hormigón Estructural como oportunidad de mejora medioambiental y económica. Aplicación a la comunidad autónoma de La Roja*. Madrid: s.n.

E. Pavón(*), M. E. N. E. D., 2012. *Estudio de la aplicabilidad del hormigón con árido grueso reciclado en La Habana, Cuba*. La Habana: s.n.

Fé, E. P. d. I., 2012. *Empleo del árido reciclado de hormigón en la fabricación* La Habana: s.n.

Fonteboá, B. G., 2002. *Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante*. s.l.:s.n.

Gutiérrez, P. A., 2008. *TIPOS Y PROPIEDADES DE ÁRIDOS RECICLADOS*. s.l.:s.n.

Gutiérrez, P. A., 2008. *Tipos y propiedades de áridos reciclados*. s.l.:s.n.

Izquierdo, I. S., s.f. *Uso de RCDs como áridos reciclados y su empleo en hormigones estructurales*. s.l.:s.n.

Juan, M. S. d., 2004. *Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural*. s.l.:s.n.

Martinera, F., 2015. *Influencia de los áridos en la Propiedades de Morteros y Hormigones*. s.l.:s.n.

Muñoz, D. M. A. B., 2012. *Aplicaciones de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición en la construcción de infraestructuras viarias*. Córdoba: s.n.

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

- NC 181, 2002. *Áridos. Determinación del Peso Volumétrico. Método de ensayo.*.. s.l.:s.n.
- NC 182, 2002. *Áridos. Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (No 200). Método de ensayo.* s.l.:s.n.
- NC 186, 2002. *Arena. Peso específico y absorción de agua. Método de ensayo.*.. s.l.:s.n.
- NC 187, 2002. *Árido grueso. Peso específico y absorción de agua. Método de ensayo.*.. s.l.:s.n.
- NC 244, 2004. *Hormigón endurecido. determinación de la resistencia a la compresión en probetas cilíndricas.*.. s.l.:s.n.
- NC 251, 2013. *Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos.*.. s.l.:s.n.
- Pérez, F. P., 2016 . *Fabricación de bloques de hormigón con áridos reciclados para colocación en sitio de exposición Cayo Santa María.*.. Santa Clara : s.n.
- Pérez, L. L., 2012 . *Utilización de áridos reciclados en la Empresa de Prefabricado Industrial de Villa Clara, para la fabricación de hormigón hidráulico.* Santa Clara : s.n.
- Petersen, S., 2015. *Optimization of a concrete produced.* s.l.:s.n.
- Rodríguez, S. B., 2015. *Ensayos a los áridos. Prácticas de Laboratorio.* s.l.:s.n.

Anexo 1

Tabla A.1 - Aditivo Dynamon SX 32

DATOS TÉCNICOS (valores característicos)	
DATOS DE IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO	
Consistencia:	líquido
Color:	ámbar
Densidad según la ISO 758 (g/cm³):	1,08 ± 0,02 a +20°C
Residuo seco según EN 480-8 (%):	22,1 ± 1,1
Acción principal:	aumento y conservación de la trabajabilidad y/o reducción de agua
Clasificación según EN 934-2:	reductor de agua de alta eficacia / superfluidificante, prospecto 11.1,11.2
Cloruros solubles en agua según EN 480-10 (%):	< 0,1 (ausentes según EN 934-2)
Contenido de álcali (Na ₂ O) equivalente según EN 480-12 (%):	< 3,5
pH según la ISO 4316:	6,5 ± 1
Conservación:	12 meses en los envases originales no abiertos, proteger del hielo
Clasificación de peligrosidad según la Directiva 1999/45/CE:	ninguna. Antes del uso consultar el párrafo "Instrucciones de Seguridad para la preparación y la puesta en obra", las instrucciones de los envases y la Ficha de Seguridad
Partida arancelaria:	3824 40 00

Anexo 2

Tabla A.2.1 – Diseño de mezclas sin encapsulamiento

Mezcla hormigón sin encapsulamiento						
			cantidad [dm³]			
			2016	58		
			kg/m³	kg (seco)	kg (mojado) corregido por humedad	
9-19			402	23,316	23,899	
absorción (total)	6,93	%	27,859	1,616	1,616	
absorción [%] (10min)	5,306	%	21,330	1,237	1,237	
Humedad [%]	2,44	%	9,809	-	0,583	
5-9			425	24,650	25,272	
absorción [%] (total)	7,79	%	33,108	1,920	1,969	
absorción [%] (10min)	3,26	%	13,855	0,804	0,824	
Humedad [%]	2,46	%	10,455	-	0,622	
0-5			628	36,424	39,808	
absorción [%] (total)	17,91	%	112,475	6,524	6,524	
absorción [%] (10min)	13,95	%	87,581	5,080	5,080	
Humedad [%]	8,5	%	53,380	-	3,384	
Agua						
Agua mezclar = 80% de	173	L	138,400		8,027	10,995
					2,967	
Agua saturar = 20% de	173	L	34,600		2,007	4,559
diferencia abs. 10 min y humedad					2,552	
Cemento			384,000		22,272	
Aditivo	0,35%				0,078	

Tabla A.2.2 – Diseño de la mezcla con encapsulamiento

Mezcla hormigón con encapsulamiento PP35 – 60						
				cantidad [dm³]		
				70		
				2016		
				kg/m³	kg (seco)	kg (mojado) corregido por humedad
9-19				402	28,140	28,673
absorción (total)	6,93	%		27,859	1,950	1,950
absorción [%] (10min)	5,306	%		21,330	1,493	1,493
Humedad [%]	1,86	%		7,477	-	0,533
5-9				425	29,750	30,835
absorción [%] (total)	1,08	%		4,590	0,321	0,333
absorción [%] (10min)	0,92	%		3,910	0,274	0,284
Humedad [%]	3,52	%		14,960	-	1,085
0-5				628	43,960	46,012
absorción [%] (total)	17,91	%		112,475	7,873	7,873
absorción [%] (10min)	13,95	%		87,581	6,131	6,131
Humedad [%]	4,46	%		28,009	-	2,052
Agua						
Agua mezclar = 80% de	173	L			9,688	11,93
					2,249	7
Agua saturar = 20% de diferencia abs. 10 min y humedad	173	L			2,422	6,659
					4,237	
Cemento				384,000	26,880	
Aditivo	0,35%				0,094	