

## **Influencia de la utilización del RCD como árido en mezclas asfálticas en caliente.**

*Influence of the use of RCD as an aggregate in hot asphalt mixtures.*



### **Ing. Debora Acosta Alvarez**

Ingeniera civil

Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría"-  
CUJAE, Departamento de Ingeniería Civil, Centro de Estudios de  
Construcción y Arquitectura Tropical. CECAT. Cuba.

E-mail: [dacostaa@civil.cujae.edu.cu](mailto:dacostaa@civil.cujae.edu.cu)



### **Ing. MSc. Reynier Moll Martínez**

Ingeniero civil

Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría"-  
CUJAE, Departamento de Ingeniería Civil, Centro de Estudios de  
Construcción y Arquitectura Tropical. CECAT. Cuba.

E-mail: [reymoll@civil.cujae.edu.cu](mailto:reymoll@civil.cujae.edu.cu)



### **Ing. Grace González Guerra**

IIIA "Instituto de Investigación de la Industria Alimentaria", La  
Habana, Cuba.

E-mail: [gracegg@nauta.cu](mailto:gracegg@nauta.cu)

Recibido: 16-09-16

Aceptado: 03-11-16

### **Resumen:**

El uso de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en la construcción de pavimentos puede ser una solución viable para preservar el consumo de recursos naturales, cubrir las necesidades de materia prima y minimizar el impacto de los vertederos. Con este fin se investiga la influencia de la utilización de los áridos reciclados de tipo hormigón en mezclas asfálticas en caliente.

Se realiza el estudio sobre la fracción tanto gruesa como fina de agregados reciclados obtenidos a partir de la trituración de probetas de hormigón procedentes de la Empresa Nacional de Investigaciones para la Construcción (ENIA) en La Habana, en aras de definir si estas mezclas cumplen con las especificaciones de la Norma Cubana NC 253:2005[1]. Luego de caracterizar estos agregados, se diseñaron cinco mezclas asfálticas en caliente SD-19, de las cuales en cuatro se sustituye el 30% y 60% por áridos reciclados tanto en la fracción fina como en la gruesa respetivamente y la quinta es una mezcla convencional. Se ensayan sus propiedades mecánicas para obtener un rango óptimo de asfalto y finalmente se comprueban los resultados de la mezcla convencional con las mezclas fabricadas con RCD

**Palabras clave:** RCD, Residuos de demolición y construcción, Mezclas asfálticas en caliente

**Abstract:**

The use of waste from construction and demolition RCD in the construction of floors can be a viable solution to preserve the consumption of natural resources, raw material needs and minimize the impact of landfills. To this end the influence of the use of recycled aggregates of asphalt mixtures in hot type is investigated.

For the study on the fine fraction of recycled aggregates obtained from the grinding of concrete specimens from the National Research Company for the Construction (ENIA) in Havana, in order to define whether these blends comply with the specifications of the Standard Cuban NC 253:2005[1]. After characterizing these aggregates, five asphalt mixes in SD-19, from which hot designed in four 30% and 60% is replaced by recycled aggregates both in the fine fraction and the coarse and the fifth is a conventional mixture. Their mechanical properties are tested to obtain an optimum range of asphalt and finally checked the results of conventional mix with mixes made whit RCD.

**Keywords:** RCD, Construction's waste and demolition, Hot asphalt mixtures

**Introducción:**

**Residuos de construcción y demolición**

En la actualidad debido a la constante evolución en la construcción, se producen toneladas de residuos sólidos como consecuencia de demoliciones, remodelaciones y nuevas construcciones que generan residuos sin una adecuada disposición final, los cuales provocan una alta contaminación ambiental, además del uso indiscriminado de los recursos naturales no renovables. Con el propósito de preservar el medio ambiente, conservar los recursos naturales, reducir los costos y aprovechar racionalmente la energía, varios países son gestores del reciclado y reutilización de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD).

La construcción de carreteras es una de las actividades más realizadas en la construcción, la cual tiene un consumo importante de recursos naturales; específicamente en la fabricación de mezclas asfálticas se emplea grandes cantidades de áridos. Estos áridos mayormente proceden de la explotación de canteras provocando graves efectos medioambientales, así como importantes gastos económicos y energéticos.

Como consecuencia de este hecho, se crean nuevas técnicas en las que los residuos de la construcción son utilizados como sustitutos de los agregados naturales. Con esta operación existen grandes ventajas para el empleo del RCD como reemplazo parcial o total del agregado natural ya que las carretas además de convertirse en un área potencial para la reutilización de residuos también favorecen la reducción de los impactos medioambientales asociados a la explotación de canteras y transporte de áridos.

En países como Bélgica, Dinamarca y Holanda el apoyo al reciclaje es reconocido por su amplio alcance, con más de 75% en los RCD. Otros países, como Reino Unido o Austria, siguen la tendencia del reciclaje de los RCD con un porcentaje aproximado del 40%[2].

De igual forma en España no con un alto porcentaje de reciclaje pero si muy útil e importante, se tiene el 15% de reciclaje de los escombros y residuos generados por las construcciones y demoliciones. Un porcentaje considerable de este 15% es comercializado para su reutilización en construcción de vías como bases o sub-bases y el resto utilizado para rellenos o restauración de espacios degradados[2].

Brasil fue el primer país en América Latina donde fue instalada una planta cuyas operaciones se enfocan en el reciclaje de estos residuos, implementando soluciones a los problemas generados, según la Resolución emitida por el Congreso nacional del Medio Ambiente -

CONAMA en el año 2002. En este país, aproximadamente el 60% del total de los residuos producidos son provenientes de procesos de construcción y demolición.[2] Otros países de América Latina como Argentina y Colombia han incursionado en el tema de reciclar RCD y darle un mejor aprovechamiento.

En Cuba, en cambio, no se da la misma situación ya que se carece de normas o recomendaciones para el empleo de materiales reciclados provenientes de desechos de la construcción.

### Desarrollo:

Se confeccionaran cinco diseños de mezclas utilizando el método de Marshall, una mezcla patrón con el agregado natural y cuatro mezclas asfálticas en las que se sustituirá el 30% y el 60% de agregado natural por RCD en la fracción fina y en la gruesa respectivamente. Se realizará la caracterización del ligante asfáltico (refinería Níco López), de los agregados naturales (cantera Alacranes) y de los RCD de la Empresa Nacional de Investigaciones aplicadas de la Habana (ENIA).

### Materiales a utilizar.

Para el desarrollo de cada uno de los diseños de mezclas se emplearán tres fracciones para combinaciones del agregado natural procedentes de la cantera "Alacranes" y una fracción de RCD proveniente de la trituración de probetas de hormigón hidráulico proveniente de la empresa ENIA, se analizará el ligante asfáltico 50-70 de la refinería Níco López.

### Caracterización del ligante asfáltico

Para establecer la caracterización del ligante asfáltico se realizaron los ensayos siguientes:

- Punto de ablandamiento: NC 516: 2007.[3]
- Viscosidad: ASTM D4402 [4]
- Ductilidad: NC 515: 2007 [5]
- Punto de inflamación y combustión: NC 438: 2006 [6]
- Índice de Penetración: NC 401: 2005 [7]
- Pérdida de peso por calentamiento: NC 54-118: 1987 [8]
- Peso específico: NC 437: 2006 [9]

En la tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos.

Tabla 1. Características del ligante asfáltico

| Ensayos realizados                              | Resultados | Normas de Referencia | de Índices de calidad | Observaciones |
|---|------------|----------------------|-----------------------|---------------|
| Penetración (100 g, 25°C, 5seg) (1/10 mm)       | 65,5       | NC 401:2005          | 50 – 70               | Cumple        |
| Punto de Ablandamiento Anillo y Bola (°C)       | 51,0       | NC 516:2007          | 51 - 58               | Cumple        |
| Punto de inflamación (°C) Copa Cleveland        | 290,0      | ASTMD 92:2007        | 230 Mín.              | Cumple        |
| Peso Especifico (g / cm <sup>3</sup> )          | 1,025      | NC 437:2005          | > 1,00                | Cumple        |
| Ductilidad (cm)                                 | 111        | NC 515:2007          | > 100                 | Cumple        |
| Pérdida por Calentamiento película delgada. (%) | 0,50       | NC 54118:1978        | ≤ 0,50                | Cumple        |

**Caracterización del agregado mineral**

Para la realización de la combinación de los agregados de la mezcla asfáltica se emplearon tres fracciones de la cantera “Alacranes”. Para establecer la caracterización del agregado mineral se realizaron los ensayos siguientes (tabla 2):

Análisis granulométrico: NC 178: 2002 [10]

Abrasión: NC 188: 2002 [11]

Peso específico y absorción de agua: NC 186: 2002 [12]

Material más fino que el tamiz # 200: NC 182: 2002 y NC 200: 2002 [13]

Peso volumétrico: NC 181: 2002 [14]

Por ciento de vacío: NC 177: 2002 [15]

Impurezas orgánicas: NC 185: 2002 [16]

Tabla 2. Característica de los áridos

| Ensayos              | Resultados |        |         | Especificación de calidad para cada capa |            |
|----------------------|------------|--------|---------|--|------------|
|                      | 19-10mm    | 10-5mm | 5-0mm   | Rodadura                                 | Intermedia |
| Peso E.C. (g/cm3)    | 2,597      | 2,577  | 2,734   | ≥ 2,5                                    | ≥ 2,5      |
| Peso E. S. (g/cm3)   | 2,649      | 2,633  | 2,761   |  |            |
| Peso E.A. (g/cm3)    | 2,738      | 2,728  | 2,81    |  |            |
| Absorción (%)        | 1,981      | 2,156  | 0,982   | 0,8 - 2,0                                | 0,8 - 2,5  |
| Peso Vol.S. (Kg/m3)  | 1307       | 1360   | 1643    |  |            |
| Peso Vol. C. (Kg/m3) | 1457       | 1559   | 1865    |  |            |
| % Vacío              | 42,8       | 39,5   | 31,8    |  |            |
| Tamiz #200 (%)       | 0,56       | 1,22   | 15,08   | ≤ 4                                      | ≤ 4        |
| Impurezas Orgánicas  |            |        | Placa 1 | ≤ Placa 3                                | ≤ Placa 3  |

**Caracterización del RCD**

Los Residuos de Construcción y Demolición utilizados son productos de la trituración de probetas de hormigón procedente de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas de la Habana .La molienda de las mismas se realiza en la máquina (Tritone, del año 2008) perteneciente al laboratorio de materiales Centro de Estudios de Construcción y Arquitectura Tropical CECAT. (Ver figura 1)



Figura 1 Máquina Tritone

Para caracterizar el RCD se llevaron a cabo los ensayos de granulometría, peso específico, peso volumétrico, porcentaje de vacío, y tamiz 200. Los resultados se muestran en las tablas 3 y 4; figura 2 y 3.

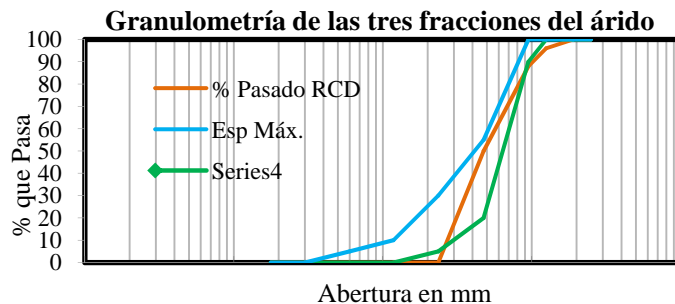


Figura 2. Granulometría RCD

Tabla 3. Caracterización de la fracción gruesa del RCD

| Ensayos                           | Resultados RCD | Especificación de calidad para cada capa |            |
|-----------------------------------|----------------|--|------------|
|                                   |                | Rodadura                                 | Intermedia |
| Peso E.C. (g/cm <sup>3</sup> )    | 2,124          | ≥ 2,5                                    | ≥ 2,5      |
| Peso E. S. (g/cm <sup>3</sup> )   | 2,319          |  |            |
| Peso E.A. (g/cm <sup>3</sup> )    | 2,639          |  |            |
| Absorción (%)                     | 9,182          | 0,8 - 2,0                                | 0,8 - 2,5  |
| Peso Vol.S. (Kg/m <sup>3</sup> )  | 1266           |  |            |
| Peso Vol. C. (Kg/m <sup>3</sup> ) | 1360           |  |            |
| % Vacío                           | 35,97          |  |            |
| Tamiz #200 (%)                    | 0,00           | ≤ 4                                      | ≤ 4        |
| Impurezas Orgánicas               | Placa 1        | ≤ Placa 3                                | ≤ Placa 3  |

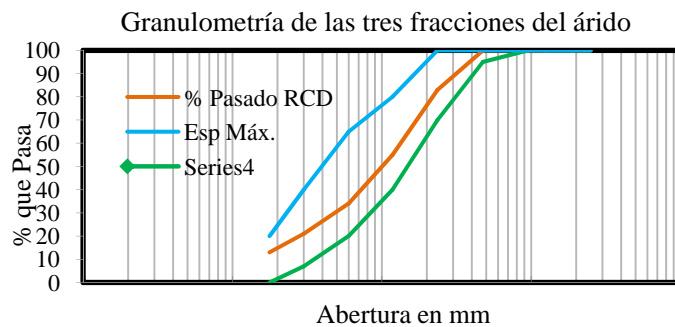


Figura 3. Granulometría RCD

Tabla 4. Caracterización de la fracción fina del RCD

| Ensayos                           | Resultados RCD | Especificación de Calidad para capa |            |
|-----------------------------------|----------------|-------------------------------------|------------|
|                                   |                | Rodadura                            | Intermedia |
| Absorción (%)                     |                | 0,8 - 2,0                           | 0,8 - 2,5  |
| Peso Vol. S. (Kg/m <sup>3</sup> ) | 1361           |                                     |            |
| Peso Vol. C. (Kg/m <sup>3</sup> ) | 1487           |                                     |            |
| Tamiz #200 (%)                    | 8,02           | ≤ 4                                 | ≤ 4        |
| Impurezas Orgánicas               | Placa 1        | ≤ Placa 3                           | ≤ Placa 3  |
| Equivalente de Arena (%)          | 91             | ≥ 55 %                              | ≥ 50%      |

Según los resultados obtenidos el árido RCD en la fracción fina no cumple con las especificaciones ya que presenta un elevado por ciento de material que pasa por el Tamiz 200, esto es debido a que el árido RCD proviene de probetas de hormigón las cuales al ser trituradas aportan bastante filler, además el peso específico corriente está por debajo de la norma. A pesar de los resultados que se muestran, se decide utilizar el RCD para observar la influencia que tiene sobre las mezclas asfálticas en caliente.

### Diseños de mezclas

Se realizaron cinco diseños de mezclas para las cuales se obtuvieron tres combinaciones de los áridos.

- Mezcla Patrón: Se realizará la combinación de tres fracciones de áridos con un 33% de gravilla, un 22% de granito y un 45% de polvo.

- Mezcla con 30% RCD (fracción gruesa): Mezcla secundaria con un 30% de RCD en su fracción gruesa. Se realizó la combinación de cuatro fracciones de agregados con un 33% de gravilla, un 15% de granito, un 45% de polvo y un 7% de RCD
- Mezcla con 30% RCD (fracción fina): Se realizó la combinación de cuatro fracciones de agregados con un 33% de gravilla, un 22% de granito, un 32% de polvo y un 13% de RCD
- Mezcla con 60% RCD (fracción gruesa): Mezcla secundaria con un 60% de RCD en su fracción gruesa. Se realizó la combinación de cuatro fracciones de agregados con un 33% de gravilla, un 9% de granito, un 45% de polvo y un 13% de RCD
- Mezcla con 60% RCD( fracción fina): Se realizó la combinación de cuatro fracciones de agregados con un 33% de gravilla, un 22% de granito, un 18% de polvo y un 27% de RCD para lograr la granulometría definitiva.

## VARIACIÓN DE PARAMETROS

### Granulometría Gruesa

A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados a la mezcla asfáltica convencional (mezcla patrón) y a las mezclas asfálticas con sustitución de un 30% y 60% de RCD en su fracción gruesa (10-15mm).

#### Densidad (Figura 4)

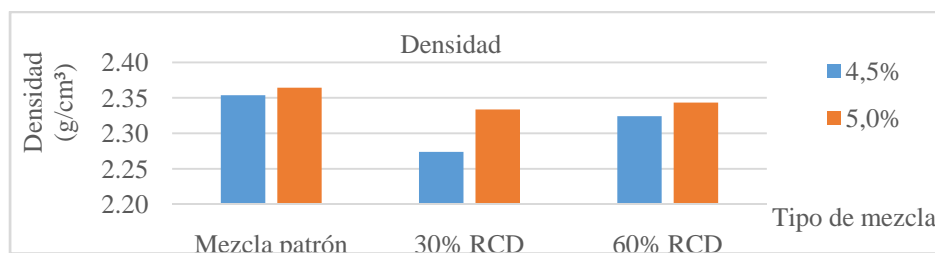


Figura 4. Resultados de densidad de mezclas con distinto contenido de RCD

La densidad de la mezcla aumenta a medida que aumenta el porcentaje de asfalto; sin embargo, disminuye con la sustitución de RCD, aunque para el 60% se puede apreciar un aumento en la densidad con respecto al 30% de sustitución.

La reducción de la densidad de cada porcentaje de asfalto de las mezclas con RCD se debe a la utilización de material reciclado en sustitución del árido original, el cual presenta mayor peso específico que el árido reciclado por el que es sustituido en las mezclas.

#### Porcentaje de huecos en la mezcla compactada (figura 5).

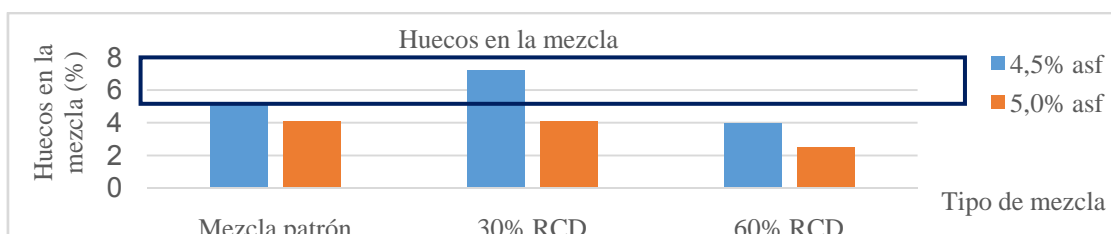


Figura 5. Resultados de Huecos en mezcla de mezclas con diferentes contenidos de RCD.

Los porcentajes de huecos en las mezclas con RCD dan valores menores respecto a la mezcla patrón, excepto para la mezcla con 30% de RCD y con un contenido de asfalto del 4,5% a pesar de tener la mezcla patrón densidades superiores.

Para la mezcla con 30% de RCD y con un contenido de asfalto del 4,5% no existe variación significativa en el porcentaje de huecos. En este caso se obtiene un porcentaje de huecos mayor al de la mezcla patrón.

Para ninguna de las mezclas con RCD, excepto para el 30% con un 4,5% de asfalto se cumplen las especificaciones, todas quedan por debajo del mínimo establecido en la NC: 253-2005[1].

#### Porcentaje de hueco en los áridos compactados.( figura 6)

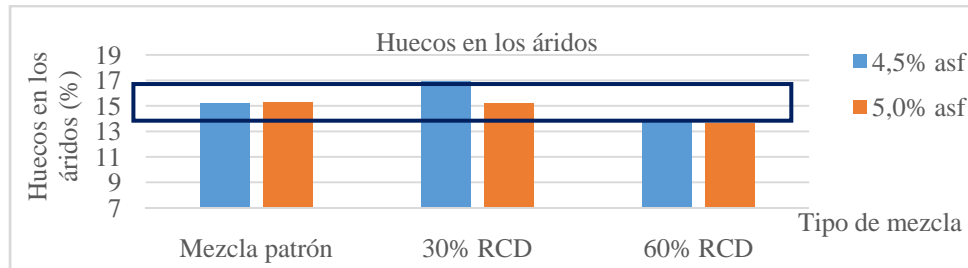


Figura 6. Resultados de Huecos en áridos de mezclas con diferentes contenidos de RCD.

Este parámetro de manera general disminuye respecto a la mezcla patrón. Como se puede observar para la mezcla de 4,5% de asfalto y 30% de RCD a una temperatura de compactación de 160°C se obtiene un resultado más elevado, aunque se encuentra cerca de las especificaciones de la norma. Esto puede ser resultado de una mala adherencia entre el ligante asfáltico y el RCD, debido al polvo que recubre el mismo producto de la trituración.

Todas las mezclas excepto para el 60% de RCD con 5.5% de asfalto cumplen las especificaciones establecidas por la NC: 253-2005[1].

#### Estabilidad.( figura 7)

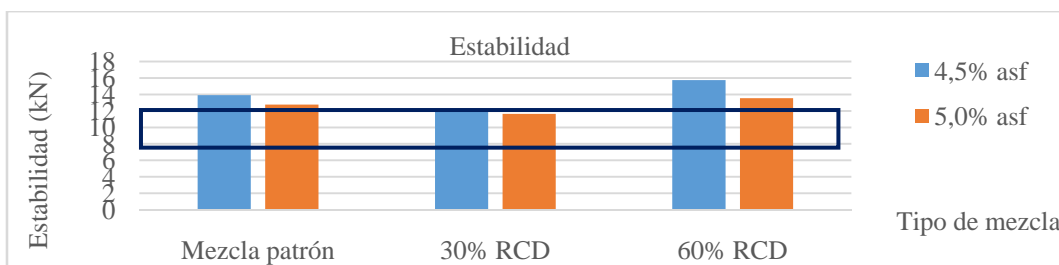


Figura 7. Resultados de estabilidad de mezclas con diferentes contenidos de RCD.

La estabilidad disminuye a medida que aumenta el contenido de asfalto, cumpliendo con las especificaciones de la NC: 253/2005[1].

Para el 30% de RCD se aprecia una disminución de la estabilidad con respecto a la mezcla patrón, lo cual no sucede en la mezcla con 60% de RCD.

#### Deformación (figura 8)

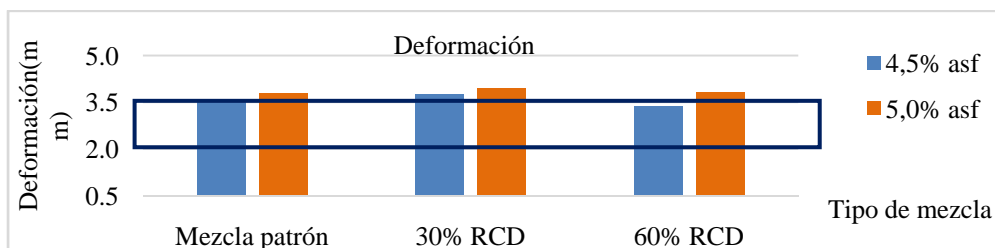


Figura 8. Resultados de deformación de mezclas con diferentes contenidos de RCD.

En la deformación se puede apreciar que no existe una influencia significativa al sustituir el árido natural por RCD, debido a que la misma se mantiene con un comportamiento uniforme en todas las mezclas.

Para el 4,5% de asfalto en la mezcla con un 30% de RCD aumenta la deformación con respecto a la mezcla patrón, lo que no ocurre para el 60% que experimenta una ligera disminución.

Las especificaciones establecidas por la NC: 253/2005 [1] para este parámetro solamente se cumplen para la mezcla patrón y la mezcla con un 60% de RCD, ambas para un contenido óptimo de ligante de 4,5%. En el caso de la mezcla con un 30% de RCD para ambos porcentajes de asfalto la deformación es mayor que el máximo definido en la norma.

**Resistencia a la tracción indirecta( figura 9)**

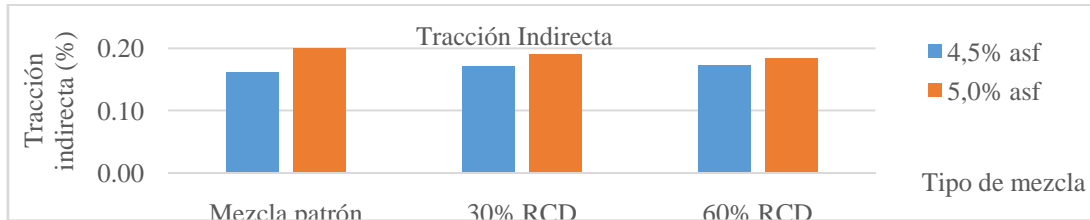


Figura 9. Resultados de la Tracción Indirecta de mezclas con diferentes contenidos de RCD.

En la tracción indirecta (TI) se puede apreciar que no existe una influencia significativa al sustituir el árido natural por RCD, debido a que la misma se mantiene con un comportamiento uniforme en todas las mezclas. Se aprecia un incremento de la resistencia a tracción indirecta al aumentar el contenido de ligante[2].

**Sensibilidad al agua (figura 10)**

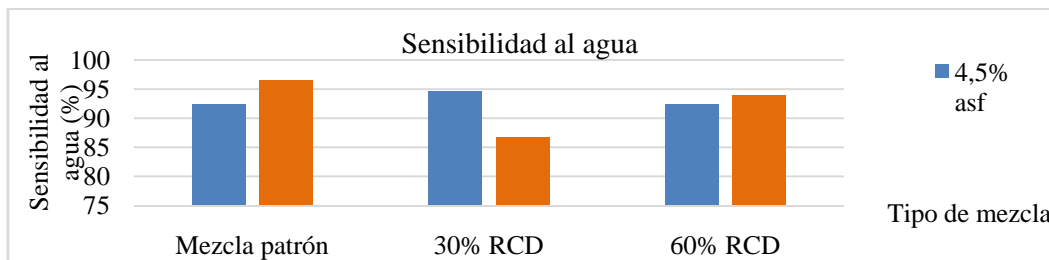


Figura 10. Sensibilidad al agua de mezclas con diferentes contenidos de RCD

En los tres diseños de mezcla el mayor valor de sensibilidad al agua se da para un contenido de asfalto de 5,0%, excepto para la sustitución del 30% de RCD. Todas las mezclas sobrepasan el 85%.

**Análisis de los resultados a partir del programa StarGraphics.**

Con el fin de determinar si la influencia del porcentaje de RCD y del porcentaje de asfalto son estadísticamente significativos en el comportamiento de los parámetros de las mezclas asfálticas en caliente, se ha realizado una tabla ANOVA y un diagrama de Pareto. Para ello, se seleccionó el programa StatgraphicsCenturion XVI (StatisticalGraphicsCorporation, Rockville, MD, USA). Las variables independientes son: estabilidad, deformación, tracción indirecta y tracción retenida. Los dos factores son: % de RCD (0% para la mezcla patrón y para las otras dos mezclas 30% y 60%) y % de asfalto (4.5% y 5.0%). Ambos factores son variables cuantitativas. Se ha realizado el análisis con la interacción de ambos factores.

Estabilidad

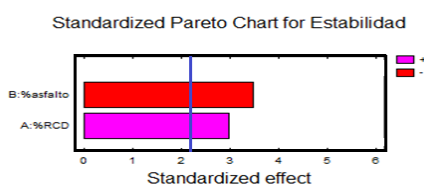


Figura 11. Diagrama de Pareto

Tabla 5. Tabla ANOVA

| Source     | P-Value |
|------------|---------|
| A:%RCD     | 0,0124  |
| B:%asfalto | 0,0051  |



Como se puede observar en el diagrama de Pareto (figura 11) y en la tabla ANOVA (tabla 5), tanto el porcentaje de RCD como el porcentaje de asfalto tienen influencia en la estabilidad.

Deformación

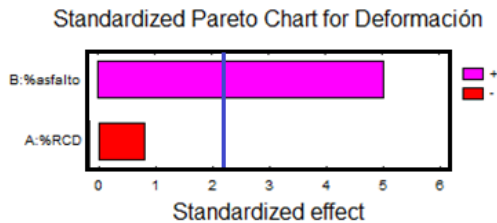


Figura 12. Diagrama de Pareto

Tabla 6. Tabla ANOVA

| Analysis of Variance for Deformación |         |
|--------------------------------------|---------|
| Source                               | P-Value |
| A:%RCD                               | 0,4414  |
| B:%asfalto                           | 0,0004  |

Los resultados mostrados en el diagrama de Pareto (figura 12) y en la tabla ANOVA (tabla 6) permiten afirmar que el porcentaje de RCD no tiene influencia en la deformación de las mezclas, no siendo así para el porcentaje de asfalto.

Tracción indirecta

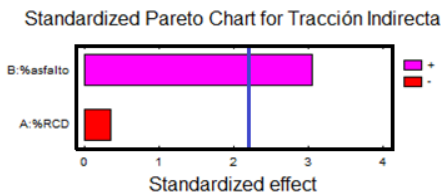


Figura 13. Diagrama de Pareto

Tabla 7. Tabla ANOVA

| Analysis of Variance for Tracción Indirecta |         |
|---|---------|
| Source                                      | P-Value |
| A:%RCD                                      | 0,7347  |
| B:%asfalto                                  | 0,0110  |

En el diagrama de Pareto (figura 13) y en la tabla ANOVA (tabla 7) se observa que el porcentaje de RCD no tiene influencia en la tracción indirecta, no siendo así para el porcentaje de asfalto.

Sensibilidad al agua

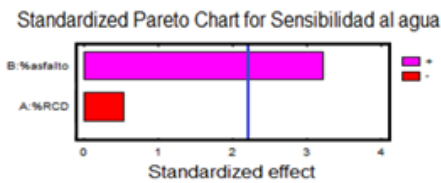


Figura 14. Diagrama de Pareto

Tabla 8. Tabla ANOVA

| Analysis of Variance for Sensibilidad al agua |         |
|---|---------|
| Source  | P-Value |
| A:%RCD  | 0,6080  |
| B:%asfalto                                    | 0,0083  |

Como se puede observar en el diagrama de Pareto (figura 14) y en la tabla ANOVA (tabla 8), el porcentaje de RCD no tiene influencia en la tracción retenida, no siendo así para el porcentaje de asfalto.

Granulometría Fina

A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados a la mezcla asfáltica convencional (mezcla patrón) y a las mezclas asfálticas con sustitución de un 30% y 60% de RCD en su fracción fina (0-5mm).

Densidad (figura 15)

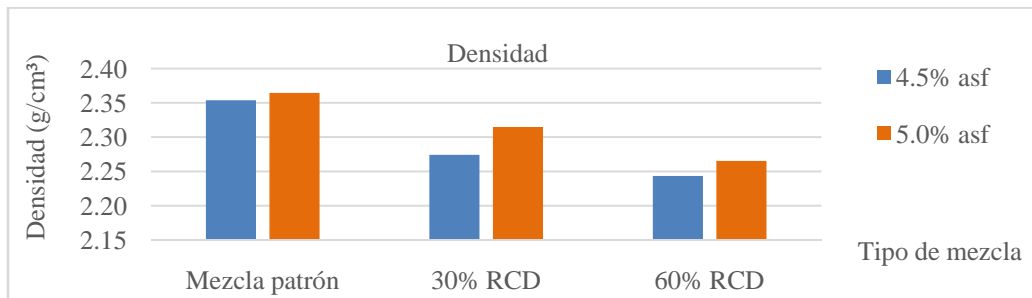


Figura 15. Densidad de mezclas con diferentes porcentajes de RCD.

En la figura 15 se observa que las densidades de las mezclas con RCD disminuyen respecto a la mezcla patrón para un mismo contenido de asfalto.

Las densidades con respecto a los tres valores de porcentaje de asfalto aumentan en la mezcla con 30% de RCD; sin embargo, en la mezcla con 60% de RCD disminuye al aumentar el contenido de asfalto comportándose similar a la mezcla patrón.

La densidad de las mezclas con RCD disminuye en cada punto de asfalto por la cantidad de árido reciclado en sustitución del árido natural, ya que este disminuye el peso específico de la mezcla.

Estabilidad (figura 16)

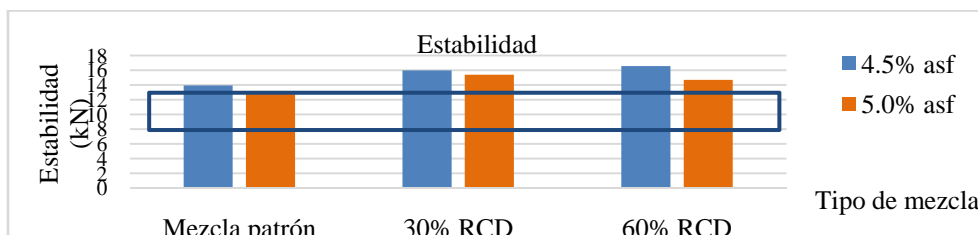


Figura 16. Estabilidad de mezclas con diferentes porcentajes de RCD.

En la mezcla patrón para un 4,5% de contenido de asfalto y las fabricadas con RCD los resultados de estabilidad son mayores que los especificados en la NC 253/2005[1].

En las mezclas fabricadas con RCD la estabilidad aumenta respecto a la mezcla patrón. Se puede observar un aumento de la estabilidad con la sustitución del RCD

Deformación (figura 17)

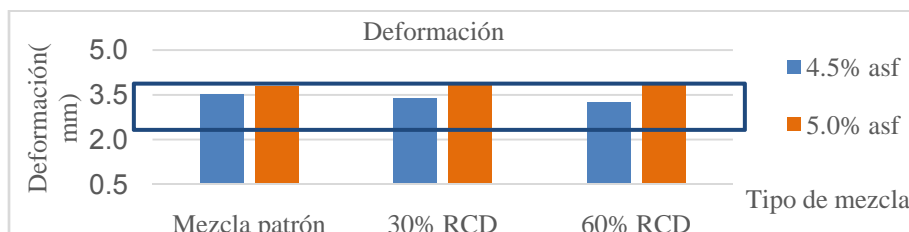


Figura 17. Deformación de las mezclas con diferentes porcentajes de RCD.

La figura 17 muestra que los tres tipos de mezcla con un 4,5% de asfalto cumplen con las especificaciones de la NC 253/2005[1].

Las mezclas con RCD para el 4.5% de asfalto experimentan una reducción de la deformación respecto a la mezcla patrón; esto significa que la mezcla es más rígida con el aumento del porcentaje de RCD.

Porcentaje de huecos en los áridos (figura 18)

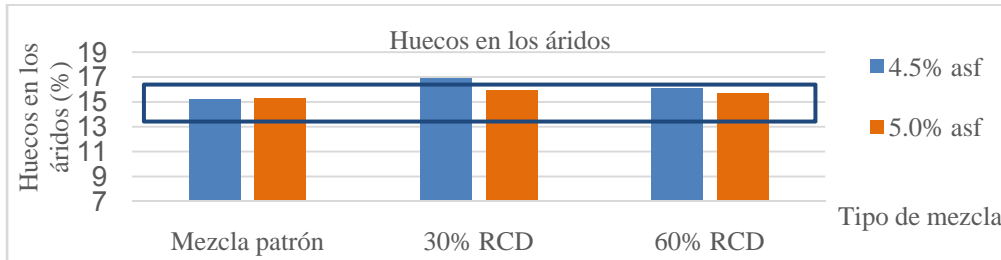


Figura 18. Porcentaje de huecos en los áridos con diferentes proporciones de RCD.

El porcentaje de huecos en los áridos se cumple la especificación de la NC 253: 2005 para la mezcla patrón y la que contiene 60% de RCD con 4,5% y 5,0% de asfalto, mientras que para la fabricada con 30% de RCD cumple para 5,0% de contenido de ligante.

Porcentaje de huecos en la mezcla( figura 19)

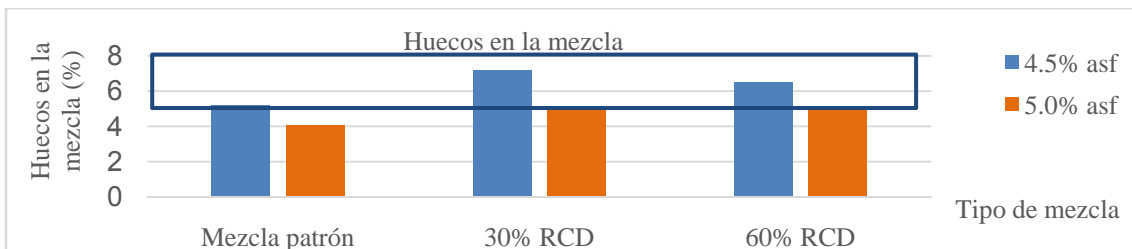


Figura 19. Porcentajes de huecos de las mezclas con diferentes proporciones de RCD.

Las especificaciones de la NC: 253/2005[1] se cumplen para los tres diseños de mezcla con un contenido de asfalto de 4,5%.

Los porcentajes de huecos en las mezclas con RCD dan valores mayores respecto a la mezcla patrón para cada contenido de asfalto, excepto para la mezcla fabricada con 30% de RCD y 5,5% de asfalto.

Resistencia a la Tracción Indirecta (figura 20)

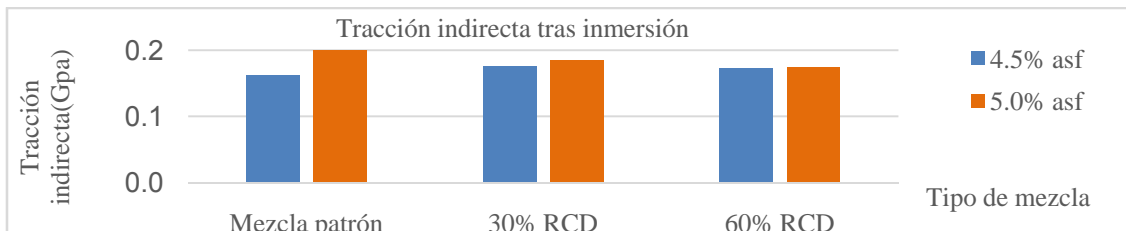


Figura 20. Tracción Indirecta de las mezclas con diferentes porcentajes de RCD.

Con el incremento del contenido de asfalto la tracción indirecta en la mezcla con 30% de RCD aumenta, mientras que en la fabricada con 60% de RCD no varía. En la mezcla patrón para el 5,5% de asfalto el resultado no sigue el patrón de comportamiento de este parámetro, es decir, que aumente la tracción indirecta al incrementar el porcentaje de asfalto.

En las mezclas con 30% y 60% de RCD para 4,5% de asfalto se confirma que la tracción indirecta no varía con el incremento del porcentaje de RCD. En la mezcla con 60% de RCD para todos los contenidos de asfalto se comporta igual la tracción indirecta.

Sensibilidad al agua( figura 21)

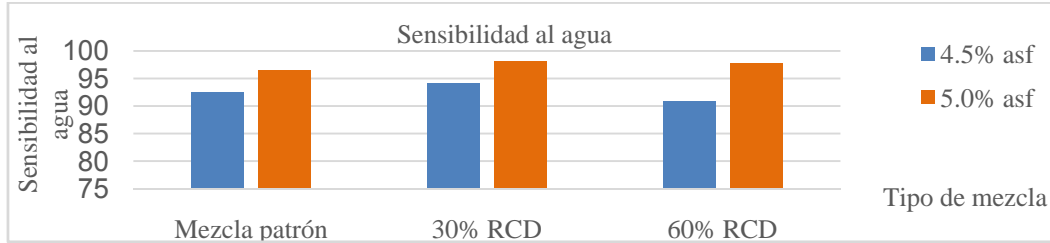


Figura 21. Sensibilidad al agua de las mezclas diseñadas con RCD.

En los tres diseños de mezcla el mayor valor de sensibilidad al agua se da para un contenido de asfalto de 5,0%. Además, son similares en las mezclas con 30% y 60% de RCD.

**Análisis probabilístico de los resultados**

Estabilidad

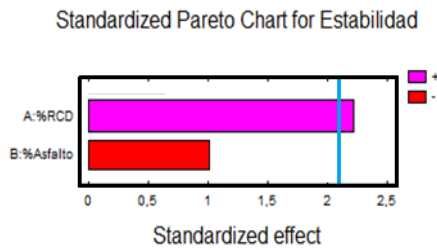


Tabla 9. Tabla ANOVA. Estabilidad

Analysis of Variance for Estabilidad

| Source     | P-Value |
|------------|---------|
| A:%RCD     | 0,0381  |
| B:%Asfalto | 0,3209  |

Figura 22. Diagrama de Pareto. Estabilidad.

Como se puede observar tanto en el diagrama de Pareto (figura 22) como en la tabla ANOVA (tabla 9), el porcentaje de RCD tiene influencia en la estabilidad, no siendo así con el porcentaje de asfalto.

Deformación

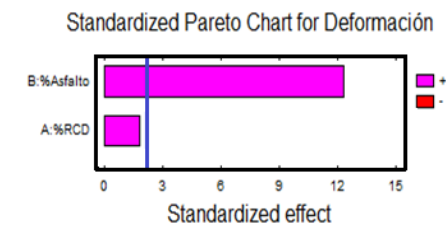


Tabla 10. Tabla ANOVA. Deformación.

Analysis of Variance for Deformación

| Source     | P-Value |
|------------|---------|
| A:%RCD     | 0,0775  |
| B:%Asfalto | 0,0000  |

Figura 23. Diagrama de Pareto. Deformación.

Como se puede observar en el diagrama de Pareto (figura 23) y en la tabla ANOVA (tabla 10), el porcentaje de asfalto tiene gran influencia en la deformación, no siendo así con el porcentaje de RCD, aunque se puede apreciar que este factor está próximo a tener influencia sobre el parámetro analizado.

### Tracción indirecta

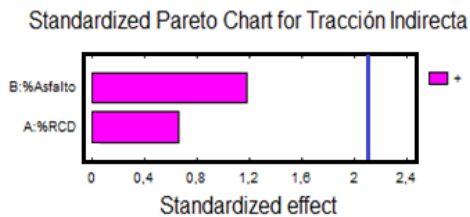


Figura 24. Diagrama de Pareto. Tracción Indirecta.

Tabla 11. Tabla ANOVA. Tracción Indirecta  
Analysis of Variance for Tracción Indirecta

| Source     | P-Value |
|------------|---------|
| A:%RCD     | 0,5134  |
| B:%Asfalto | 0,2503  |

Como se puede observar en el diagrama de Pareto (figura 24) y en la tabla ANOVA (tabla 11), ni el porcentaje de RCD ni el porcentaje de asfalto tiene influencia sobre la tracción indirecta.

### Sensibilidad al agua

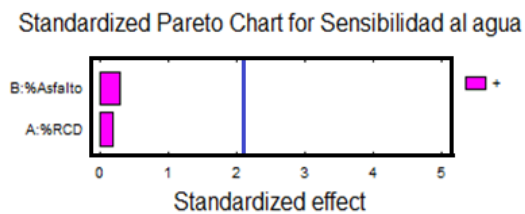


Figura 25. Diagrama de Pareto. Sensibilidad al agua.

Tabla 12. Tabla ANOVA. Sensibilidad al agua  
Analysis of Variance for Sensibilidad al agua

| Source     | P-Value |
|------------|---------|
| A:%RCD     | 0,8377  |
| B:%Asfalto | 0,7672  |

Como se puede observar en el diagrama de Pareto (figura 25) y en la tabla ANOVA (tabla 12), ni el porcentaje de RCD ni el porcentaje de asfalto tiene influencia sobre la sensibilidad al agua.

### Conclusiones:

1. La aplicación del RCD para la fabricación de mezclas asfálticas en caliente es una alternativa que ha tenido su aplicación internacionalmente y se muestra viable para Cuba.
2. El uso de RCD en mezclas asfálticas en la fracción gruesa influye de forma positiva en propiedades como porcentaje de huecos en áridos y huecos en la mezcla.
3. La durabilidad de las mezclas con RCD en la fracción gruesa mejora con respecto a las mezclas convencionales.
4. La tracción indirecta de las mezclas no tiene una significativa variación con el empleo del RCD.
5. La sustitución de árido natural por RCD disminuye la densidad de las mezclas asfálticas en caliente
6. La incorporación de RCD en las mezclas asfálticas supone un menor deterioro del medio ambiente y un ahorro económico considerable debido a la disminución del consumo de áridos naturales y la eliminación de vertederos.
7. En los ensayos realizados al Residuo de Construcción y Demolición se demostró que la única especificación que no se cumple es la que establece la norma cubana para el peso específico.

**Referencias bibliográficas:**

1. NC 253: 2005. *Carreteras-Materiales Bituminosos-Hormigón Asfáltico Caliente-Especificaciones*. 2005, Oficina Nacional de Normalización: La Habana, Cuba.
2. PASADÍN, A.M., *Sensibilidad al agua y propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas en caliente, fabricadas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición*. 2013.
3. NC 516:2007. *Determinación del Punto de Ablandamiento mediante el Método Anillo y Bola*. .
4. ASTM D4402. *Viscosidad*.
5. NC 515:2007. *Ductilidad de Materiales Bituminosos*
6. NC 438:2006. *Punto de inflamación y combustión*.
7. NC 401:2005. *Materiales bituminosos métodos de ensayos de penetración..*
8. NC 54-118:1978. *Perdida de peso por calentamiento*.
9. NC 437:2006. *Peso específico*. .
10. NC 178:2002. *Análisis Granulométrico*.
11. NC 188:2002. *Abrasión*.
12. Normalización, O.N.d., *Peso específico y absorción*.
13. NC 182:2002. *Tamiz 200*. .
14. NC 181:2002. *Peso volumétrico*.
15. NC 177:2002. *Por ciento de vacío*
16. NC 185:2002. *Impurezas orgánicas*.