



Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de un agregado de concreto reciclado

Natalia Pérez García
Paul Garnica Anguas
Araceli Rivera

**Publicación Técnica No. 514
Sanfandila, Qro, 2018**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas
de un agregado de concreto reciclado**

Publicación Técnica No. 514
Sanfandila, Qro, 2018

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por la Dra. Natalia Pérez García, el Dr. Paul Garnica Anguas y Araceli Rivera, estudiante de ingeniería civil del Tecnológico de Tehuacán.

Se agradece a la empresa PRECOVA el haber proporcionado y trasladado el agregado de concreto reciclado, desde sus instalaciones de la Ciudad de México.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna ii-13/13. "Evaluación de algunas propiedades de residuos de demolición para su aplicación a la construcción de carreteras".

Contenido

Índice de tablas	v
Índice de figuras	vii
Sinopsis	ix
Abstract	xi
Resumen ejecutivo	xiii
Introducción	1
Objetivo	2
Organización	2
1. Agregados naturales y agregados producto de concreto reciclado	5
1.1. Introducción	5
1.2. Los agregados pétreos naturales	6
1.3. Los agregados producto de concreto reciclado	8
1.3.1. Definición de agregado de concreto reciclado (RCA)	8
1.3.2. Usos del agregado de RCA	8
1.3.3. Propiedades típicas de los agregados de concreto reciclado	10
1.3.4. Limitaciones para el uso de agregados producto de concreto reciclado	12
2. Estudios de laboratorio con agregados producto de RCA	15
2.1. Introducción	15
2.2. Estudios del agregado de RCA en laboratorio	15
2.3. Algunas especificaciones para uso del agregado de concreto reciclado, en la construcción de carreteras	27
2.3.1. Especificaciones para agregado de RCA en algunas entidades (o territorios*) de Estados Unidos	26
3. Materiales, equipo y procedimiento de prueba	31
3.1. Descripción de los materiales utilizados	31
3.2. Procedimientos para determinar propiedades índice de los materiales	33
3.3. Características de compactación del agregado de concreto reciclado.	33
3.4. Equipo triaxial utilizado en la determinación de propiedades mecánicas	33
3.5. Procedimientos de prueba para módulo de resiliencia, deformación permanente y resistencia en compresión confinada y no confinada	35
3.5.1. Preparación de los especímenes de prueba	35
3.5.2. Prueba de módulo de resiliencia	39
3.5.3. Pruebas de compresión con y sin confinamiento	41
3.5.4. Prueba de deformación permanente	41

4. Resultados	43
4.1. Introducción	43
4.2. Propiedades índice	43
4.3. Granulometría	44
4.4. Curvas de compactación	45
4.5. Pruebas de módulo de resiliencia	46
4.6. Pruebas de deformación permanente	49
4.6.1. Curva típica de una prueba de deformación permanente	50
4.6.2. Resultados de deformación en agregado de concreto reciclado	50
4.6.3. Resultados de deformación en agregado tradicional	52
4.7. Resultados de resistencia al esfuerzo cortante	53
5 Conclusiones y recomendaciones	59
Bibliografía y referencias	61

Índice de tablas

	Página
Tabla 1.1. Materias primas utilizadas en el sector de la construcción (cantidades aproximadas) (Walters, 1995).	5
Tabla 1.2. Volumen de la producción minera, 2014-2015 (toneladas)	6
Tabla 1.3. Propiedades de los agregados de RCA (Reporte FHWA-RD-97-148) (2008) citado por Schaertl y Edil, 2009).	10
Tabla 1.4. Comparación de las propiedades del agregado tradicional y las del producto de concreto reciclado (Snyder et ál., 1994, citado por Van Dam et ál., 2011).	11
Tabla 1.5. Contenido de agua óptimo y peso volumétrico seco de agregados de RCA reportados por varios investigadores (Fuente: Schaertl y Edil, 2009).	11
Tabla 1.6. Uso del agregado de concreto reciclado como material granular (basado en ACPA 2009; Hiller et ál., 2011, citados por Van Dam et ál. 2011).	12
Tabla 2.1. Resultados de las pruebas de clasificación.	17
Tabla 2.2. Resultados de las pruebas de resistencia a compresión (Jayakody et ál., 2014)	22
Tabla 2.3. Propiedades físicas de los agregados convencionales y los RCA.	22
Tabla 2.4. Especificaciones propuestas para el RCA.	27
Tabla 2.5. Granulometrías para bases granulares densas.	27
Tabla 2.6. Requisitos físicos adicionales para las bases granulares densas.	28
Tabla 2.7. Granulometrías para agregados de granulometría abierta. Capa drenante abierta y modificada.	28
Tabla 3.1. Normativa utilizada para caracterizar el concreto reciclado.	33
Tabla 3.2. Secuencias de carga aplicadas en la prueba de módulo de resiliencia para un material de base o subbase de acuerdo con el protocolo NCHRP 1-28A.	40
Tabla 4.1. Resumen de las propiedades índice de los materiales estudiados.	43
Tabla 4.2. Densidades y absorciones de los materiales estudiados.	44
Tabla 4.3. Características de los especímenes ensayados en módulo de resiliencia.	46
Tabla 4.4. Módulos de resiliencia del agregado de concreto reciclado.	46
Tabla 4.5. Valores promedio de Mr y coeficientes de variación en cada secuencia.	47
Tabla 4.6. Módulos de resiliencia de la base granular natural.	47
Tabla 4.7. Valores promedio de Mr y coeficientes de variación para la	48

Tabla 4.8.	base granular natural. Características de los especímenes ensayados y presión confinante utilizada en la prueba de resistencia al esfuerzo cortante.	54
------------	---	----

Índice de figuras

	Página
Figura 1.1. Distribución de la demanda de agregados en la industria de la construcción (Fuente: BACMI, 1991 citado por Mendonça, 1997).	6
Figura 1.2. Usos del agregado de RCA (Wilbum, 1998 citado por Saeed, 2006).	8
Figura 1.3. Usos aprobados del agregado de concreto reciclado (Gallican, 2011; citado por Ellis et ál., 2014).	9
Figura 2.1. Materiales que conformaron el material en estudio.	16
Figura 2.2. Comportamiento del módulo de resiliencia con el tiempo de curado.	17
Figura 2.3. Resultados de módulo de resiliencia de especímenes compactados al 98% del peso volumétrico seco máximo de las pruebas Proctor estándar y modificada.	18
Figura 2.4. CBR de los materiales estudiados (modificado de El-Maaty, 2013).	19
Figura 2.5. Influencia del contenido de cemento en la resistencia a compresión.	19
Figura 2.6. Influencia de la cantidad de finos en la resistencia a compresión (tiempo de curado: 3 días).	20
Figura 2.7. Resultados de módulo de resiliencia del RCA a diferentes contenidos de agua (Gallage et ál., 2014).	21
Figura 2.8. Comparativa de los resultados de módulo de resiliencia (de Aydilek, 2015).	23
Figura 2.9. Resultados de las pruebas de deformación permanente (de Aydilek, 2015).	24
Figura 2.10. Evolución de la resistencia a compresión respecto al tiempo de curado (Fuente: Blankenagel, 2005).	25
Figura 3.1. Planta PRECOVA de materiales reciclados.	31
Figura 3.2. (a) Concreto reciclado; (b) Material todo en uno.	32
Figura 3.3. (a) Material retenido en la malla de una pulgada; (b) cuarteo del material a tamaño de 50 kg aproximadamente.	32
Figura 3.4. Unidades que componen el equipo triaxial cíclico. (a) Unidad de aplicación de carga; (b) Unidad de regulación de presión de aire y sistema de adquisición de datos.	34
Figura 3.5. (a) Mezclado del agregado de concreto reciclado con el agua de compactación; (b) Molde de compactación y membrana de latex colocados en la base de la cámara triaxial y; (c) Compactación del espécimen.	36

Figura 3.6.	(a) Nivelado de la superficie de la muestra; (b) Muestra compactada; (c) Sellado de la membrana en los cabezales.	36
Figura 3.7.	Muestra de agregado de concreto reciclado colocada en el equipo triaxial.	37
Figura 3.8.	Molde de compactación para especímenes de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura.	38
Figura 3.9.	(a) Compactación en el molde; (b) Enrase de la superficie de la muestra y; (c) Muestra colocada en el cuarto de curado.	39
Figura 4.1.	Curvas granulométricas de los agregados.	44
Figura 4.2.	Curvas de compactación Proctor modificada del agregado de concreto reciclado y agregado natural.	45
Figura 4.3.	Comparativa de los valores de módulo de resiliencia para la base granular y el agregado de concreto reciclado.	49
Figura 4.4.	Curva típica de una prueba de deformación permanente.	50
Figura 4.5.	Pruebas de deformación y módulos de resiliencia en muestras de agregado de concreto reciclado.	51
Figura 4.6.	Pruebas de deformación a 250 000 ciclos en muestras de agregado de concreto reciclado y módulos de resiliencia.	52
Figura 4.7.	Pruebas de deformación a 20 000 y 250 000 ciclos de agregado tradicional y módulos de resiliencia.	53
Figura 4.8.	(a) Curvas esfuerzo-deformación de las muestras de concreto reciclado ensayadas después de la compactación; (b) Círculos de Mohr.	55
Figura 4.9.	(a) Curvas esfuerzo-deformación de las muestras de concreto reciclado ensayadas después de 7 días de curado; (b) Círculos de Mohr.	56
Figura 4.10.	(a) Curvas esfuerzo-deformación de las muestras de concreto reciclado ensayadas después de 28 días de curado; (b) Círculos de Mohr.	57
Figura 4.11.	(a) Curvas esfuerzos-deformación de las muestras de agregado tradicional ensayadas después de compactarse; (b) Círculos de Mohr.	58

Sinopsis

En esta investigación fueron determinadas las propiedades físicas y mecánicas de un agregado de concreto reciclado que cumple con granulometría de base. Los resultados fueron comparados con las propiedades de un agregado tradicional de base, para determinar la factibilidad de usar el agregado de concreto reciclado como material de construcción en carreteras. Los resultados indicados en este documento muestran que el agregado de concreto reciclado cumple con los requisitos de calidad de base, de acuerdo con la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes; el único parámetro que no cumple es el desgaste de Los Ángeles, como también ya se ha mostrado en la literatura.

Respecto a las propiedades mecánicas, el agregado de concreto reciclado mostró tener módulos de resiliencia ligeramente mayores a los del agregado tradicional. En las pruebas de deformación permanente, se observó que el concreto reciclado muestra deformación resiliente menor que el agregado tradicional, lo que se traduce en módulos de resiliencia mayores. Finalmente, las pruebas de resistencia al esfuerzo cortante mostraron que la cohesión del agregado de concreto reciclado se incrementa ligeramente con el tiempo de curado; el ángulo de fricción interna no presenta un cambio importante.

Abstract

In this research, a granular base material of recycled concrete was evaluated through physical and mechanical properties. The results were compared with the properties of a traditional granular base material in order to determine the feasibility of using aggregate of recycled concrete as a material for highway construction.

The results indicated in this document show that the aggregate of recycled concrete meets the basic quality requirements in accordance with the regulations of the Ministry of Communications and Transportation of Mexico; the only parameter that does not comply is the resistance to degradation in the Los Angeles Machine as has also been shown in the literature.

Regarding the mechanical properties, the aggregate of recycled concrete showed resilient modulus slightly higher than those observed in the traditional aggregate. In the tests of permanent deformation, it was observed that the recycled concrete shows a lower resilient deformation that is translated into greater resilient modulus. Finally, the shear strength tests showed that the cohesion of the recycled concrete increases slightly with the curing time; the internal friction angle does not show any significant change.

Resumen ejecutivo

El concreto constituye uno de los materiales de construcción más importantes en varias obras de Ingeniería civil; por ejemplo, edificios, presas, carreteras, etc. Es común que después de cierto tiempo de servicio, algunas de las estructuras construidas con concreto tengan que ser demolidas para dar paso a nuevas construcciones. El proceso de demolición genera grandes cantidades de residuos que deben disponerse de alguna manera.

Por otro lado, la industria de la construcción requiere millones de toneladas de agregados (gravas, arenas) y suelos con calidad adecuada para la construcción de diferentes obras. Esto ha traído como consecuencia una fuerte degradación al medio ambiente, por la explotación de bancos de materiales; que, además, cuando dejan de ser explotados, quedan como huecos que en muchas ocasiones son rellenados con basura o con materiales que pueden ser peligrosos.

Desde hace décadas, en países tanto de Europa como del continente Americano se han reciclado diferentes residuos de construcción. En el área de carreteras, ya están utilizando los agregados de concreto reciclado para ser colocados como base o subbase. En México no es práctica usual usar estos materiales en la construcción de carreteras u otras estructuras, debido a la falta de conocimiento de las propiedades de dichos materiales.

En este documento, se presenta un estudio sobre el tema de agregados de concreto reciclado. El primer capítulo muestra algunas cantidades de los de agregados naturales que son utilizados en la industria de la construcción. Posteriormente se describe qué es el agregado de concreto reciclado y se mencionan algunas propiedades físicas que han sido reportadas en la literatura. Después se aborda el tema de las propiedades mecánicas a través de los estudios que han realizado otros investigadores, los que han demostrado que en muchas ocasiones el agregado de concreto reciclado muestra mejores propiedades con respecto al agregado tradicional.

Por otro lado, cuando se introduce un nuevo material en la industria de la construcción, es importante saber cómo será controlada su calidad. En la última parte del capítulo dos aparecen las especificaciones de algunas entidades de Estados Unidos, para el agregado de concreto reciclado.

En este mismo capítulo, también se indica que en varios documentos ha sido publicado que el agregado de concreto tiene ventajas; pero también que este material tiene que ser sometido a pruebas químicas, para evaluar si los lixiviados no constituyen un problema.

En el capítulo tres, se describen los materiales, procedimientos y equipos utilizados en la obtención de las propiedades mecánicas. A continuación (capítulo cuatro) se indican los resultados obtenidos tanto en las pruebas físicas como mecánicas. En cuanto a pruebas mecánicas, se determinaron módulos de resiliencia, los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante (c y ϕ) y también las pruebas de deformación permanente a 20 000 y 250 000 ciclos.

Los resultados muestran que el agregado de concreto reciclado cumple con los requisitos de calidad de base, de acuerdo con la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes; el único parámetro que no cumple es el desgaste de Los Ángeles, como también ya se ha mostrado en la literatura.

Respecto a las propiedades mecánicas, el agregado de concreto reciclado mostró tener módulos de resiliencia ligeramente mayores a los del agregado tradicional. En las pruebas de deformación permanente, se observó que el concreto reciclado muestra deformación resiliente menor que el agregado tradicional, lo que se traduce en módulos de resiliencia mayores. Finalmente, las pruebas de resistencia al esfuerzo cortante mostraron que la cohesión del agregado de concreto reciclado se incrementa ligeramente con el tiempo de curado; el ángulo de fricción interna no presenta un cambio importante.

Al final del documento se muestran las conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación.

Introducción

El continuo incremento de construcción de obra civil en nuestro país demanda cada vez una mayor cantidad de agregados que provienen de cauces de ríos o bancos de materiales. Esto ha traído como consecuencia una degradación cada vez más importante al medio ambiente, por las grandes áreas de explotación que se tienen en la actualidad. Es común ver en varias zonas del país grandes cortes en las formaciones rocosas de donde se extraen o extrajeron cantidades impresionantes de materiales. Estos cortes no sólo se observan en la roca, sino también en las áreas donde se encuentran suelos con propiedades adecuadas para la construcción (Figura 1.1).



Figura 1.1. Bancos de materiales

(Fuente: <http://www.jornada.unam.mx/2016/05/20/estados/028n1est> y <http://laverdaddetlajomulco.blogspot.mx/2013/07/>)

Por otro lado, es frecuente que las estructuras en las que fueron utilizados los agregados o materiales antes mencionados sean demolidas cuando han cumplido con su vida útil o simplemente cuando se requiere construir algo más moderno; estas demoliciones generan billones de toneladas de “residuos de construcción”. Países de la Unión Europea -como Dinamarca, Suecia, Finlandia, Bélgica, entre otros- reutilizan un porcentaje importante de sus residuos; sin embargo, naciones como México aún no reutilizan la mayor parte de sus residuos, por la escasez de investigación sobre el tema.

Es entendible entonces que los constructores se muestren escépticos cuando alguien les propone utilizar elementos reciclados como materia prima de construcción; puesto que es desconocido su comportamiento, tanto en campo como en laboratorio.

El trabajo que se presenta en este documento fue enfocado en el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de un agregado de concreto reciclado; ya que, aunque varias investigaciones realizadas en el extranjero indican el potencial de estos materiales, en México aún no son muy aceptados. Por otro lado, la normativa para construcción de carreteras no incluye el uso de agregados de materiales reciclados; lo que dificulta aún más su aprobación.

Objetivo

Determinar las propiedades físicas y mecánicas de un agregado de concreto reciclado, para valorar su posible utilización como material de base o subbase.

Para lograr el objetivo general, se llevaron a cabo las siguientes etapas:

- Obtención del agregado de concreto reciclado.
- Determinación de las propiedades físicas y características de compactación.
- Preparación de los especímenes para determinar resistencia a compresión no confinada, módulo de resiliencia, parámetros de resistencia al esfuerzo cortante y deformación permanente.
- Comparación de las propiedades del agregado de concreto reciclado con las características requeridas para base y subbase especificadas en la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- Comparación de las propiedades mecánicas del agregado de concreto reciclado con respecto a las obtenidas en un agregado natural con granulometría similar.

Organización

La estructura del trabajo consiste en presentar datos sobre los agregados tradicionales y agregados de concreto reciclado (capítulo uno). Asimismo, se indican algunas de las barreras por las que el agregado de concreto reciclado no ha sido completamente aceptado como material de construcción en carreteras. En el capítulo dos se presentan estudios de laboratorio en donde se evaluaron varias propiedades de los agregados de concreto reciclado. Uno de los grandes obstáculos en la aceptación del agregado del concreto reciclado es el no contar con especificaciones para controlar la calidad del material. Al final del capítulo dos se presentan algunas de las especificaciones usadas en Estados Unidos, para este tipo de agregado.

En el capítulo tres, se describen los materiales, equipos y procedimientos de prueba utilizados en el estudio. Se pone especial énfasis en los procedimientos de las pruebas para obtener las propiedades mecánicas (deformación, módulo de resiliencia y resistencia a la compresión confinada y no confinada).

La discusión de los resultados se presenta en el capítulo cuatro. En este apartado se abordan los resultados de las propiedades físicas, tanto del agregado de concreto reciclado como del agregado tradicional. Posteriormente se discuten los resultados de resistencia a compresión no confinada; la determinación de los valores de la cohesión y el ángulo de fricción de los materiales; para finalizar, se resumen los resultados de módulo de resiliencia y deformación permanente.

Al final se emiten algunas conclusiones y se comenta sobre futuras líneas de investigación.

1 Agregados naturales y agregados producto del concreto reciclado

1.1. Introducción

En los últimos años, el sector de la construcción se ha configurado como una de las actividades clave del crecimiento de la economía de nuestro país. Sin embargo, esto ha traído como consecuencia una fuerte degradación del medio ambiente, por las grandes cantidades de insumos requeridos (cementos, plásticos, pinturas, agregados pétreos, etc.) (Tabla 1) y que en alguna parte del proceso constructivo producen cantidades importantes de residuos.

Tabla 1.1. Materias primas utilizadas en el sector de la construcción (cantidades aproximadas) (Wolters, 1995)

Material	% en volumen
Arena	60
Grava	14
Caliza (producción de cemento)	6
Arcilla	6
Roca natural	4
Yeso natural	1
Metales	4
Madera	2
Petróleo (plásticos)	3
Total	100

Nota: Datos tomados de "Monografía sobre residuos de construcción y demolición".

Un ejemplo de insumos en el sector de las carreteras es el siguiente: cada kilómetro de carretera construida requiere grandes cantidades de roca, concreto, asfalto y acero. Un pavimento de concreto asfáltico de doble carril, en donde la base es un material granular, requiere hasta 25 000 toneladas de material por kilómetro; lo que muestra por qué los agregados son el recurso más minado en el mundo (Newman et ál., 2011).

Al respecto, Mendonça (1997) indica que la construcción, rehabilitación y ampliación de pavimentos consume aproximadamente un tercio de la producción de agregados naturales, al menos en Inglaterra (Figura 1.1).

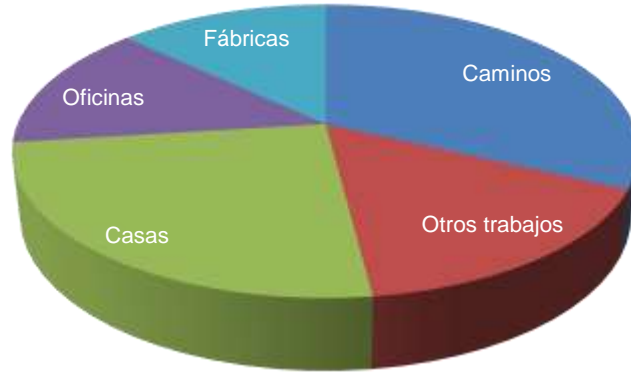


Figura 1.1. Distribución de la demanda de agregados en la industria de la construcción en Inglaterra

(Fuente: BACMI, 1991 citado por Mendonça, 1997)

1.2. Producción de agregados pétreos naturales

El documento “Estudio de la cadena productiva de los materiales pétreos”, publicado por la Secretaría de Economía en 2013, indica que resulta complicado encontrar una referencia formal sobre el inicio de la extracción de agregados pétreos en el territorio nacional. Pero de acuerdo con los restos encontrados en las construcciones de la época prehispánica, resulta evidente que estos minerales han sido ampliamente utilizados para la edificación de casas, ciudades, monumentos y plazuelas.

Desde la época de la Colonia y hasta nuestros días, hay información de diferentes centros de extracción de agregados pétreos sin que se tenga un registro o reporte confiable de los volúmenes o tonelaje producidos; principalmente porque su consumo es local e inmediato, además de que los productores no están obligados a presentar información al respecto; por lo que es difícil hacer un seguimiento histórico de sus volúmenes de producción a nivel general (SE, 2013).

Información de los últimos años con respecto a la producción de los materiales comúnmente utilizados en la construcción de carreteras puede ser encontrado en el Anuario Estadístico de la Minería, edición 2016. Este documento muestra cómo se ha incrementado el volumen de estos materiales (Tabla 1.2).

Tabla 1.2. Volumen de la producción minera, 2014-2015 (toneladas)

Producto	2014	2015
Agregados pétreos	417,312,834.19	49,647,481,547.40
Arena	129,469,274.43	15,422,666,948.93
Grava	102,909,448.41	12,635,814,232.52
Tepetate	2,049,976.81	39,385,714.10
Tezontle	31,425,744.40	1,320,939,108.01

Otros estimados de la producción de agregados en otros países son los siguientes:

- La producción de agregados en Ontario probablemente esté entre 100 y 200 millones de toneladas anuales; y la demanda proyectada en áreas urbanas es de 1.5 billones de toneladas, en los próximos 25 años (Binstock y Carter-Whitney, 2011; citados por Mallick et ál., 2014).
- De una reserva de 3.4 billones de toneladas de agregado de Ontario, solo el 43% aparece como de alta calidad (adecuado para concreto y asfalto) (Ministerio de Recursos Naturales de Ontario, 2009; citado por Mallick et ál., 2014).
- Minnesota usa cerca de 4.5 millones de toneladas de agregado cada año, para actividades de mantenimiento de su red carretera (aproximadamente 213 000 km) (aggregates Resources Task Force, 1998; citado por Mallick et ál., 2014).
- California usó aproximadamente 162 millones de toneladas de agregados cada año, entre 1981 y 2010 (Clinkenbeard, 2012; citado por Mallick et ál., 2014).

Por su parte, la Administración Federal de Carreteras (FHWA) indica que en Estados Unidos se producen 2 billones de toneladas de agregado natural cada año, y que probablemente se incremente a 2.5 billones de toneladas por año; esto preocupa desde el punto de vista de disponibilidad de ese recurso en los próximos años (Cooley y Hornby, 2012).

Un informe reciente de USGS (Langer, 2011 citado por Mallick et ál., 2014) proporciona una visión integral de la disponibilidad de agregados naturales en los Estados Unidos. Señala que este recurso escasea en lugares como la llanura costera y la bahía de Misisipi, la meseta de Colorado y la cuenca de Wyoming, el medio oeste glaciar, etc. Señala además que sería necesario un aumento del 70% en la producción de agregado natural anual, para rehabilitar completamente la infraestructura de Estados Unidos.

De lo anterior, se puede notar que la extracción de agregados pétreos -con su consecuente daño al medio ambiente- ya constituye una preocupación mundial; debido a esto, existen agencias y organismos que ya han propuesto algunas formas de evitar seguir haciendo daño al medio ambiente. Al respecto, reutilizar el concreto producto de demoliciones de diferentes construcciones es uno de los temas actuales. Considerando esto, la investigación que se muestra a continuación tiene como objetivo contribuir al conocimiento del comportamiento de los agregados de concreto reciclado; de tal manera que los resultados constituyan una fuente de información para los involucrados en la construcción de caminos y para aquellos que formulan la normativa del mismo sector.

1.3. Los agregados producto del concreto reciclado

1.3.1. Definición de agregado de concreto reciclado (RCA)

En la revista “Cement Concrete & Aggregates” de Australia, describen el agregado de concreto reciclado como:

“Agregado grueso producto del disgregado de residuo de demolición con 95% en peso del concreto y que tiene un nivel de contaminante menor a 1% con respecto a la masa total”.

A este respecto, la Administración Federal de Carreteras (FHWA), limitó la definición de agregado de concreto reciclado (RCA) al subproducto de pavimentos de concreto Portland viejo; de puentes, de banquetas, cunetas y canales. La razón de delimitar la definición es que, en Florida, Estados Unidos, se usa agregado de alta calidad que debe tener propiedades especificadas (Ellis et ál., 2014).

1.3.2. Usos del agregado de RCA

Los agregados de concreto reciclado han sido usados predominantemente en la construcción de pavimentos como reemplazo de los materiales vírgenes de base, subbase, y -con menos frecuencia- en la carpeta asfáltica y en losas de concreto. Wilburn (1998) (citado por Saeed, 2006) estima que aproximadamente 68% del agregado de RCA se usa como capa de base/subbase (Figura 1.2).

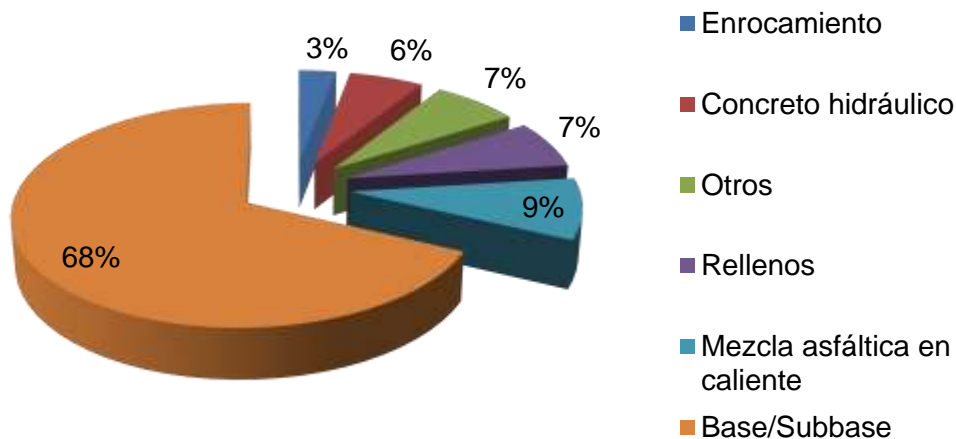


Figura 1.2. Usos del agregado de RCA

(Wilburn, 1998 citado por Saeed, 2006)

Referente a lo anterior, Gallican (2011) (citado por Ellis et ál., 2014) muestra un mapa en donde se puede observar cómo permiten utilizar el agregado de concreto reciclado, en Estados Unidos (Figura 1.3).

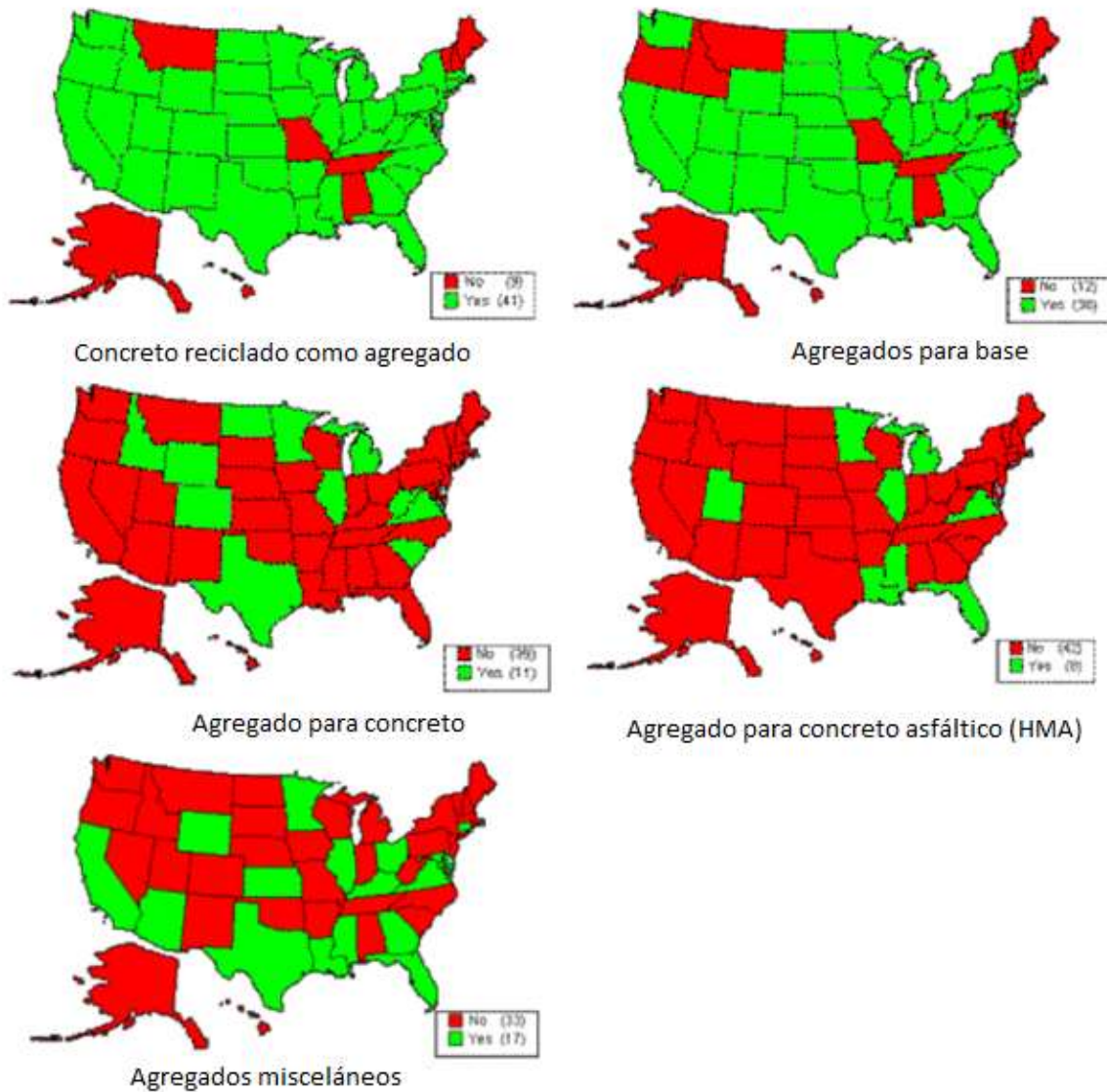


Figura 1.3. Usos aprobados del agregado de concreto reciclado

(Gallican, 2011, citado por Ellis et ál 2014).

1.3.3. Propiedades típicas de los agregados de concreto reciclado

Uno de los primeros cuestionamientos en cuanto a los agregados del concreto reciclado es: ¿cómo varían sus propiedades con respecto a un agregado tradicional? En torno a esta cuestión, se ha encontrado que los rangos de algunas propiedades son los siguientes:

Tabla 1.3. Propiedades de los agregados de RCA (Reporte FHWA-RD-97-148 (2008) citado por Schaertl y Edil, 2009)

Propiedad física	Rango de variación
Gravedad específica	2.2 a 2.5 (Partículas gruesas) 2.0 a 2.3 (Partículas finas)
Absorción	2 a 6 (Partículas gruesas) 4 a 8 (Partículas finas)
Propiedad mecánica	Rango de variación
Abrasión por medio de la pruebas de los Ángeles	20-45 (Agregado grueso)
Pérdida mediante la prueba con sulfato de magnesio	4 o menos (Agregado grueso) Menor que 9 (Partículas finas)
California Bearing Ratio (CBR)	94-148%

Aunado al tema de propiedades, Van Dam et ál. (2011) comparan algunas de las propiedades del agregado de concreto reciclado, con propiedades de agregado natural (Tabla 1.4). Estos autores afirman que el agregado de concreto reciclado es muy angular como resultado del proceso de triturado. Por otro lado, indican que la diferencia entre ambos agregados se debe a que el proveniente de concreto reciclado está formado por agregado natural y mortero; esta combinación proporciona una mayor absorción, menor gravedad específica y una menor resistencia a la abrasión. A medida que la cantidad de mortero se incrementa, las propiedades tienen mayor diferencia.

Tabla 1.4. Comparación de las propiedades de agregado tradicional y las del producto de concreto reciclado (Snyder et ál., 1994, citado por Van Dam et ál., 2011)

Propiedad	Agregado natural	Agregado de concreto reciclado
Forma de partícula y textura	Redondeado, agregados con caras planas y angulares y roca triturada áspera	Angular y superficie áspera
Capacidad de absorción	0.8-3.7%	3.7-8.7%
Gravedad específica	2.4-2.9	2.1-2.4
Desgaste en la máquina Los Ángeles	15-30%	20-45%
Pérdida mediante la prueba con sulfato de sodio	7-21%	18-59%
Pérdida mediante la prueba con sulfato de magnesio	4-7%	1-9%
Contenido de cloruros	0-1.2 kg/m ³	0.6-7.1 kg/m ³

Schaertl y Edil (2009) reportaron la recopilación de varias propiedades del agregado del concreto reciclado. Entre dichos atributos se tienen las características de compactación; estas aparecen en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5. Contenido de agua óptimo y peso volumétrico seco de agregados de RCA reportados por varios investigadores (Fuente: Schaertl y Edil, 2009).

Material	Energía de compactación	Densidad seca máxima (kg/m ³)	Contenido de agua óptimo (%)
Bennert RCA	estándar	1984	7.5
Blankenagel demolición	modificada	1830	9.7
Blankenagel concreto reciclado de sobrante de lotes de concreto	modificada	2020	10.6
Saeed RCP-LS-IL	estándar	1971	11.0
Saeed RCP-GV-LA	estándar	1950	9.0
Saeed RCP-GR-SC	estándar	1990	9.5
Kuo UCF	modificada	1823	11.2
Kuo FDOT	modificada	1839	12.1

Las propiedades del agregado de concreto reciclado han conducido a serias preocupaciones en su uso. Van Dam et ál. (2011) mencionaron algunos de estos problemas y las posibles soluciones (Tabla 1.6).

Tabla 1.6. Uso del agregado de concreto reciclado como material granular

(basado en ACPA 2009; Hiller et ál., 2011, citados por Van Dam et ál. 2011)

Propiedad o característica del agregado de RCA	Problemática	Medida de mitigación
Forma de la partícula y textura	Forma irregular y altamente angular lo que puede provocar una trabajabilidad pobre.	Parte gruesa: No causa problemas en mezclas de concreto nuevo. Parte fina: Limitarlo a 30% o menos.
Gravedad específica	Menor que el agregado natural y se reduce con la disminución del tamaño de partícula.	Abordado a través del diseño de la mezcla.
Resistencia a la abrasión	Menor resistencia a la abrasión comparada con el agregado natural.	Generalmente cumple con los requisitos para las mezclas de concreto.
Resistencia a la abrasión	Generalmente cumple con la prueba de pérdida mediante el ensayo con sulfato de magnesio, pero no la de pérdida con sulfato de sodio.	La inconsistencia en los resultados necesita que se renuncie a este criterio.
Contenido de cloruros	El contenido de cloruros generalmente es alto cuando se utilizan productos para derretir el hielo en el concreto fuente; lo que trae preocupación en el tiempo de fraguado, durabilidad del concreto y la corrosión del acero.	Agregado grueso: Generalmente el contenido de cloruros es bajo y no preocupa. Agregado fino: Puede ser alto; por lo tanto, debe limitarse la cantidad de agregado fino. Proteger el acero con un revestimiento o material no corrosivo.
Reacción álcali-sílica	Si la fuente de concreto sufrió dicha reacción, puede ser problema para nuevas aplicaciones.	No es problema si se aplica como agregado sin cementante. Si se utiliza como agregado ligado con cemento, se debe verificar si no se presenta la reacción.
Lixiviados	Si se utiliza como capa drenante, los lixiviados pueden comprometer la funcionalidad del sistema.	No lo use como capa drenante, especialmente la fracción fina.

1.3.4. Limitaciones para el uso de agregados producto de RCA

El concreto reciclado ha mostrado que puede ser una fuente adecuada para obtención de agregados utilizables en proyectos carreteros; sin embargo, existen algunos casos documentados en donde aparecen algunas desventajas. Por ejemplo, Cooley y Hornsby (2012) indican que Petrarca et ál. (1984) investigaron el uso de RCA -el RCA era producto de concreto de banquetas, calles, cunetas y pavimentos- en proyectos locales de Nueva York, entre 1977 y 1982. Realizaron más de 100 pruebas y concluyeron que el agregado de RCA cumplía de forma adecuada si se utilizaba como material de base o subbase; pero recalcaron que la calidad del agregado dependía del origen del concreto. Por ejemplo, mencionaron que el agregado producto de concreto prefabricado tiene agregado más pequeño; por lo tanto, tiene una resistencia a compresión mayor si es comparado con el concreto utilizado en pavimentos. Indicaron también que la cantidad de aire contenido en el concreto afecta su adecuabilidad como agregado.

Snyder y Bruinsma (1996) (Citados por Cooley y Hornsby, 2012) reportaron resultados de diez estudios en donde utilizaron agregado de RCA (cinco de campo y cinco de laboratorio). En sus estudios de campo evaluaron los sistemas de drenaje existentes en pavimentos en donde habían utilizado agregado de RCA y agregados naturales. Estos investigadores observaron que la base de agregado de RCA tenía el potencial de precipitar calcita, que es un material muy alcalino (midieron valores de pH hasta 11 y 12). Sin embargo, indicaron que el pH alcanzaba un máximo después de introducir el agua y se reducía con el paso del tiempo. Reportaron que la vegetación que se encontraba cerca de los drenajes, murió. Por otro lado, también señalaron que la cantidad de carbonato de calcio que se precipitaba era proporcional a la cantidad de agregado de RCA que pasaba la malla No. 4 y que, si el agregado se lavaba antes de ser colocado, prácticamente se eliminaba la formación de carbonato de calcio.

Otra de las preocupaciones de carácter ambiental al usar el agregado de RCA fue que los constituyentes del fluido de los materiales almacenados fueron el arsénico, el cloro, el aluminio y el vanadio. Las cantidades fueron comparadas con las permitidas para el agua potable; los autores señalan que probablemente no debieron comparar con esos valores; indicaron también que el concreto en el cual realizaron las pruebas era producto de demolición de edificios y no de pavimentos.

La reacción álcali-agregado (AAR) o reacción álcali-sílica (ASR) es otro de los problemas potenciales que puede aparecer al usar el agregado de RCA. Como consecuencia de tales reacciones, pueden presentarse expansiones y por lo tanto agrietamiento del pavimento (Cooley y Hornsby, 2012).

El ataque de sulfatos es otra de las posibles desventajas, cuando se usa agregado de RCA. El cemento está formado de muchos componentes, pero el aluminato tricálcico (C_3A) y el yeso (C_sH_2) son los que preocupan. Durante el proceso de hidratación, el C_3A reacciona con los iones de sulfato que produce la disolución del yeso; la reacción genera etringita. Cuando hay suficiente sulfato, la etringita se convierte a monosulfoaluminato. El ataque de sulfatos ocurre en el concreto endurecido; si los monosulfoaluminatos se ponen en contacto con una nueva fuente de iones de sulfato (de suelos con alto contenido de sulfato, agua del nivel freático, agua de mar, etc.), los monosulfoaluminatos se convierten en etringita que viene acompañado por un incremento de volumen (arriba de 200%). Este incremento de volumen trae como consecuencia agrietamiento en el concreto endurecido (Cooley y Hornsby, 2012).

Por otro lado, Mendonça (1997) menciona que otros obstáculos para encontrar mercados para los agregados producto de residuos de demolición son:

- Abundancia y bajo costo de materiales granulares de alta calidad, lo que representa un porcentaje bajo en el costo de las carreteras
- Bajo costo de disposición de los residuos

- Variabilidad inherente de estos materiales, lo que significa sobrecostos para llevar a cabo su procesamiento y ensaye para asegurar un comportamiento adecuado
- El no cumplir con especificaciones que cumplen los materiales tradicionales para construcción de carreteras y lo inadecuado de las especificaciones para aplicación directa de materiales secundarios
- Los costos de recolectar, almacenar y procesar
- Los costos de transporte de las fuentes hacia las zonas de mayor demanda y
- Los ingenieros confían más en los agregados tradicionales

A los puntos anteriores, Moore et ál. (2014) adicionan otras razones por las que no se usan los agregados de RCA, entre ellas se encuentran:

- La resistencia de las agencias por adoptar materiales nuevos
- El uso de especificaciones obsoletas
- Preocupaciones de responsabilidad y comportamiento de nuevas tecnologías
- Restricciones ambientales que no se aplican a materiales convencionales
- Escasez de guía técnica
- Distribuidores muy dispersos o cantidades pequeñas de materiales potencialmente reciclados
- Investigación inadecuada

2 Estudios de laboratorio con agregados producto de RCA

2.1. Introducción

Al llevar a cabo la revisión de la literatura publicada con respecto al uso de agregados producto de RCA, es importante mencionar que varios países han contribuido al conocimiento de las propiedades y comportamiento en campo y laboratorio de estos materiales. A continuación, se comentan los resultados de algunos de los trabajos publicados, especialmente aquellos en los que se estudió este material como agregado para utilizarlo en la construcción de carreteras.

2.2. Estudios del agregado de RCA en laboratorio

En una investigación de agregados de RCA y agregado natural, llevada a cabo por Bennert y Maher (2005) (citado por Bennert y Maher, 2008), encontraron que mezclas 50:50 y 75:25 (RCA-agregado de base natural) presentaban una permeabilidad adecuada (60 a 70 ft/day) y los valores de CBR entre 160 y 180%. Recientemente, la especificación del Departamento de Transporte de New Jersey fue modificada y permite una mezcla 50:50.

Por su parte, Jayakody et ál, (2012) llevaron a cabo un estudio de seis muestras de concreto reciclado. De los ensayos encontraron que las muestras presentaron valores de CBR mayores a 50%; con lo cual, los autores concluyeron que los seis tipos de concreto reciclado cumplían como material de subbase y base para tránsito bajo.

Semejante a los estudios anteriores, Gómez y Farías (2012) estudiaron las propiedades de un agregado de concreto reciclado producto de la demolición de un estadio de futbol, de Brasil. El material original contenía pedazos de mortero, tejas, ladrillos, cerámica y azulejos. Del material, fueron descartados materiales como tubos de PVC, madera y plásticos (Figura 2.1).

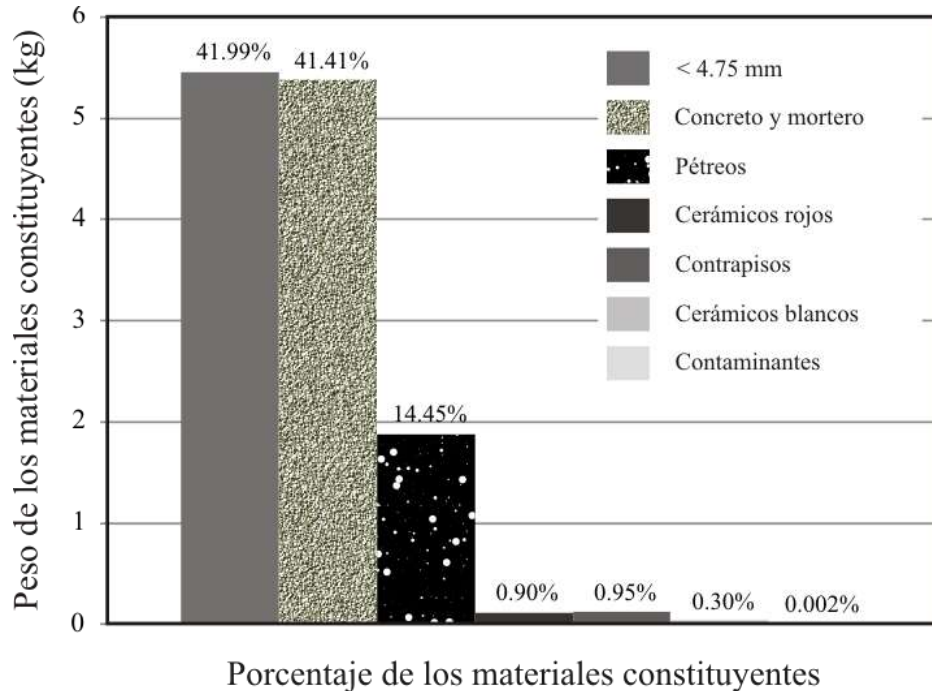


Figura 2.1. Materiales que conformaron el material en estudio

Las propiedades de este material fueron: absorción de 7.7%, gravedad específica de 2.49 que evidencia la baja densidad, abrasión en la máquina de Los Ángeles en el rango de 35-38%. El rompimiento de partículas también fue evaluado en este estudio; encontraron que a mayor energía de compactación mayor rompimiento de partículas; sin embargo, este efecto se reducía a medida que incrementaba el contenido de agua. El contenido de agua óptimo para la energía Proctor estándar y modificada fue adoptado con un valor de 13%. Este valor fue el utilizado para preparar especímenes de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, para la prueba de módulo de resiliencia; la cual se llevó a cabo de acuerdo con el procedimiento AASHTO T307/99. Los tiempos de curado estudiados fueron 0, 1, 7, 15, 30, 60 y 90 días.

Resulta interesante hacer notar que solo en los primeros días de curado, el módulo de resiliencia presenta un incremento, y más allá de 15 días (Figura 2.2), este parámetro tiende a disminuir; lo cual fue atribuido al paso del agua de los macroporos a los microporos del material.

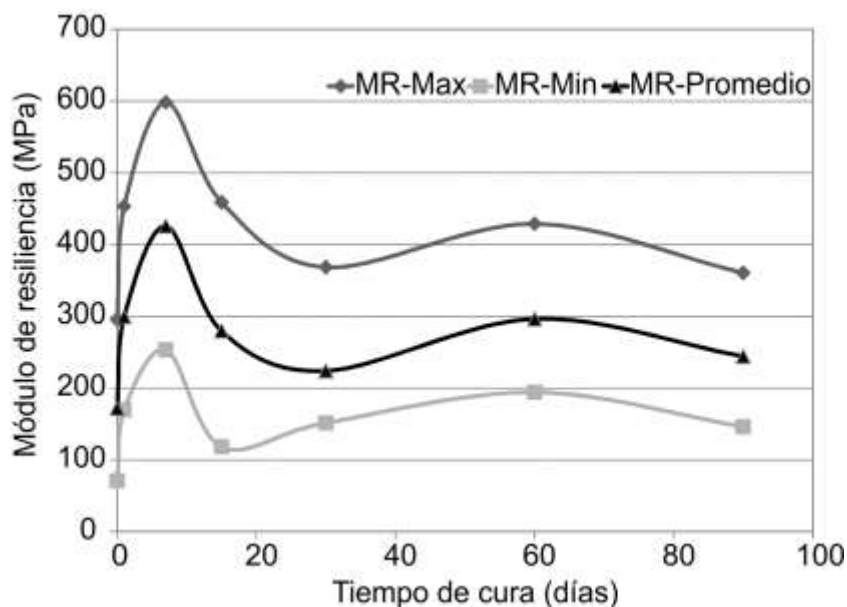


Figura 2.2. Comportamiento del módulo de resiliencia con el tiempo de curado

Autores como Cooley y Hornsby (2012) ensayaron siete agregados de RCA obtenidos de diferentes proveedores de Mississippi. Dos RCA eran producto de pavimento de concreto rígido, cuatro eran producto de demolición de construcciones y uno provenía de concreto pretensado. La Tabla 2.1 resume los resultados de las propiedades índice de los materiales. En su estudio, Cooley y Hornsby (2012) también evaluaron tres agregados naturales de roca caliza.

Tabla 2.1. Resultados de las pruebas de clasificación

Propiedad	RCA1	RCA2	RCA3	RCA4	RCA5	RCA6	RCA7
Abrasión en la prueba de los ángeles (%)	28	28	29	27	29	32	32
Microdeval (%)	10	20	20	19	17	16	16
Intemperismo en sulfato de magnesio (%)	2	11	1	2	5	2	1
% vacíos del agregado fino	43	39	46	47	43	46	43
% vacíos del agregado grueso	45	42	45	47	44	46	48
Límite líquido (%)	20	37	30	19	26	26	NP
Límite plástico (%)	NP	NP	29	NP	NP	23	NP
Índice de plasticidad (%)	NP	NP	1	NP	NP	3	NP
Gravedad específica aparente	2.599	2.590	2.575	2.567	2.580	2.573	2.607
Gravedad específica bruta	2.276	2.057	2.166	2.267	2.141	2.195	2.284
Gravedad específica bruta aparente	2.400	2.264	2.325	2.383	2.312	2.343	2.408
Absorción (%)	5.5	10.0	7.3	5.2	7.9	6.7	5.4

Sus resultados indicaron que obtenían valores de módulo de resiliencia mayores en los agregados de concreto que eran producto de demolición de pavimento de concreto rígido y el pretensado; alcanzaron valores inferiores en los concretos cuyo origen era demolición de construcción. Por otro lado, también compararon sus resultados con módulos de resiliencia obtenidos en agregados de caliza y observaron los valores más altos en este tipo de materiales; esto para

especímenes compactados con energía Proctor estándar y modificada (Figura 2.3).

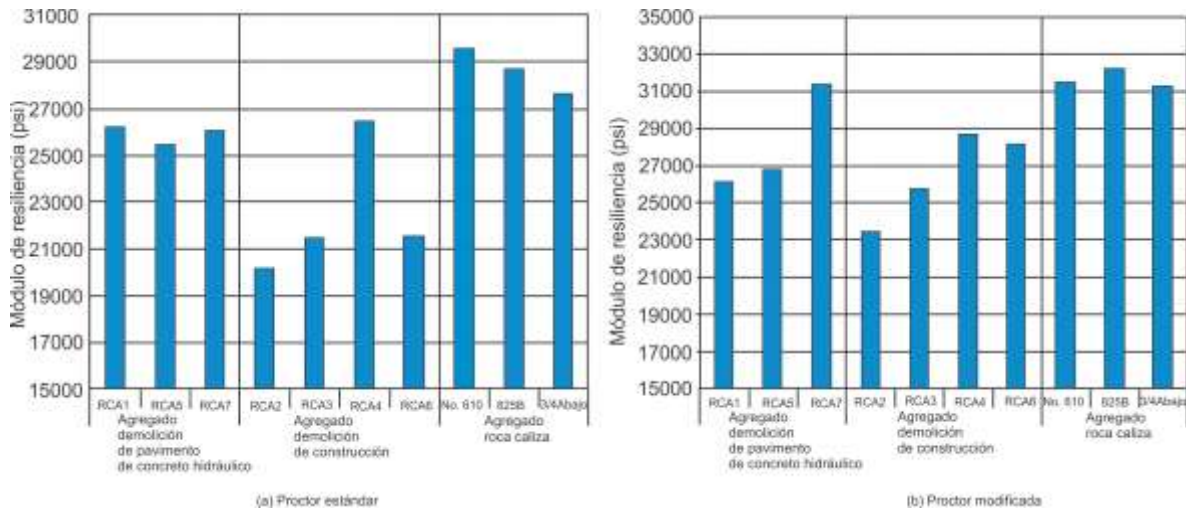


Figura 2.3. Resultados de módulo de resiliencia de especímenes compactados al 98% del peso volumétrico seco máximo, de las pruebas Proctor estándar y modificada

Los autores concluyeron que es recomendable utilizar agregado de RCA cuyo origen sea pavimento de concreto hidráulico.

A. E. Abu El-Maaty (2013), de la Universidad de Menoufia (Egipto), realizó una investigación cuyo objetivo fue comparar las propiedades mecánicas de una base granular de material calizo con las propiedades de muestras preparadas con una mezcla de material calizo y agregado de concreto reciclado. Los porcentajes de RCA fueron 25, 50, 75 y 100 %; el tamaño máximo del agregado tanto del calizo como del concreto reciclado fue de 2 in y la cantidad de finos fue de 5 % para el agregado natural, y 4.8 para el RCA.

Con las características de los materiales mencionados, las pruebas indicaron una mayor absorción y menor gravedad específica para el agregado de concreto reciclado; el ángulo de fricción interna se duplicó en dicho agregado (47°). Con respecto al valor de CBR, éste se fue reduciendo a medida que incrementaba la cantidad de agregado reciclado (Figura 2.4).

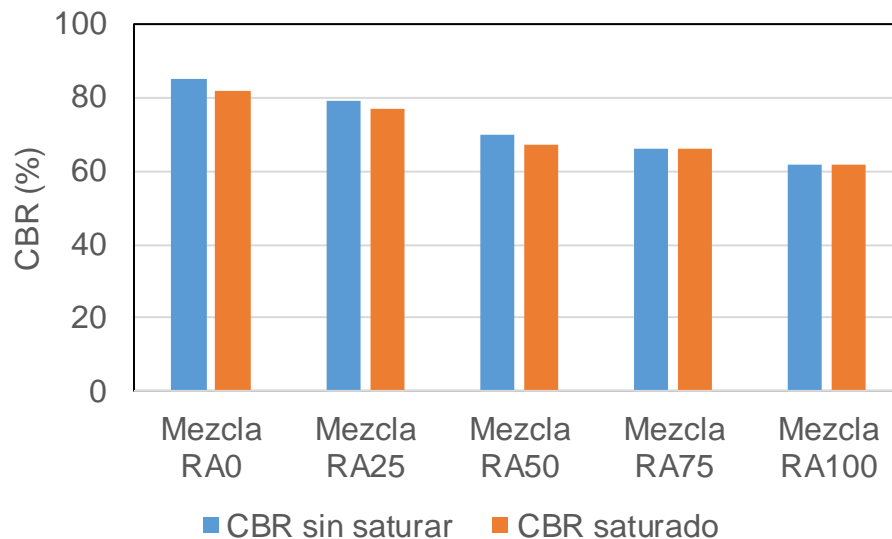


Figura 2.4. CBR de los materiales estudiados (modificado de El-Maaty, 2013)

Otra de las propiedades evaluadas por El-Maaty fue la resistencia a la compresión. En el estudio, era de interés determinar cómo se modificaba la resistencia si le agregaban ciertas cantidades de cemento. Lo que encontró fue que a medida que incrementaba la cantidad de cemento (de 4% a 7%), la resistencia también aumentaba; pero las muestras de agregado de concreto reciclado mostraron una mayor resistencia (Figura 2.5). Sin embargo, el incremento en la resistencia no solo dependía del contenido de cemento; al parecer la cantidad de finos también jugaba un papel importante, como lo indica la Figura 2.6.

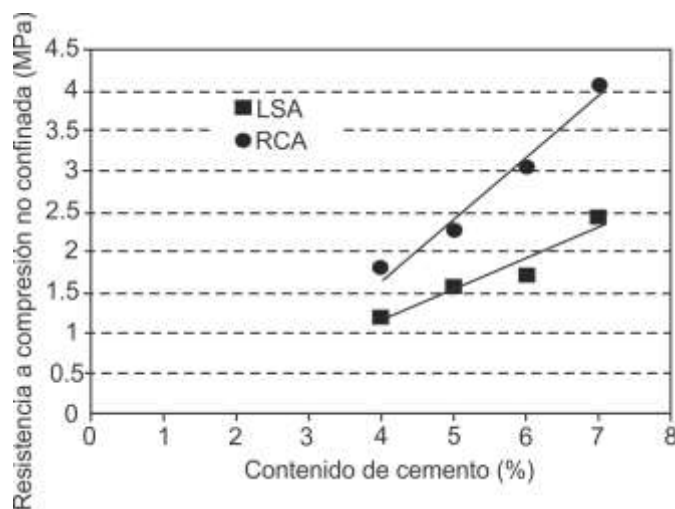


Figura 2.5. Influencia del contenido de cemento en la resistencia a compresión

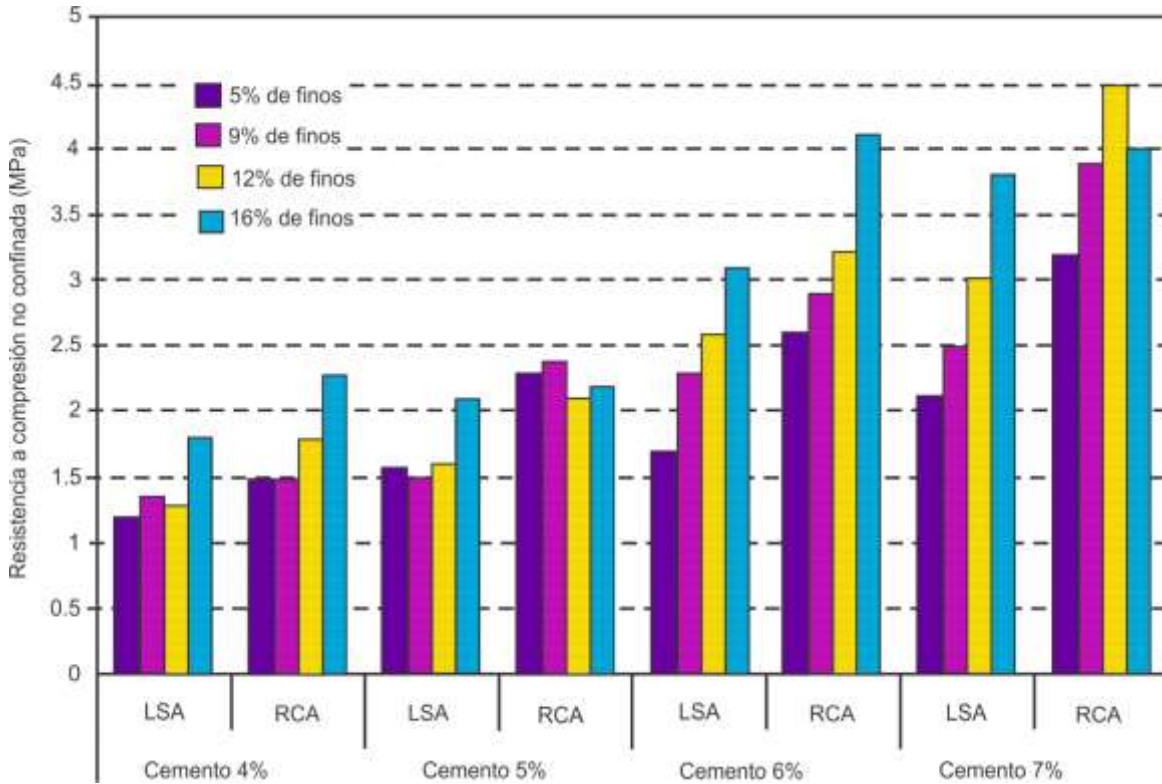


Figure 2.6. Influencia de la cantidad de finos en la resistencia a compresión (Tiempo de curado: 3 días)

En 2014, Gallage et ál. reportaron resultados de un estudio que llevaron a cabo con un agregado producto de RCA, comercializado en Queensland, Australia. En el trabajo, llevaron a cabo pruebas de módulo de resiliencia (M_r) a diferentes contenidos de agua (11.6, 13.2, 14.5 y 15.5%), mientras que el peso volumétrico lo mantuvieron constante en un valor de 16.68 kN/m^3 . Realizaron las pruebas de M_r con una presión de confinamiento de 125 kPa y los esfuerzos desviadores fueron de 175, 325, 475 y 625 kPa. En cada secuencia, aplicaron 1000 ciclos de carga. La señal para aplicar la carga fue tipo haversine; esta fue aplicada durante un segundo y posteriormente usaron un tiempo de retraso de dos segundos.

Los resultados de las pruebas de M_r indicaron que -como ya ha sido demostrado en otras investigaciones para materiales tradicionales- este parámetro disminuye a medida que incrementa el contenido de agua (Figura 2.7).

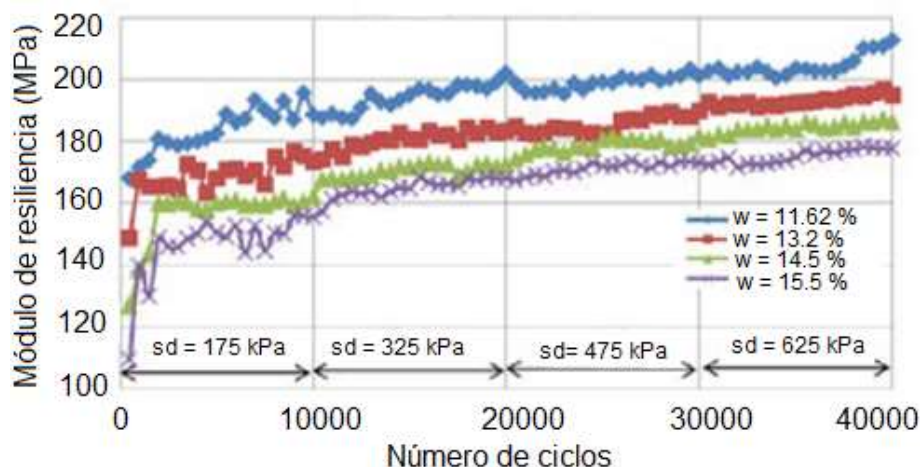


Figura 2.7. Resultados de módulo de resiliencia del RCA a diferentes contenidos de agua (Gallage et ál., 2014)

En el mismo año, Jayakody et ál. (2014) publicaron un trabajo en el que estudiaron el comportamiento de dos agregados de concreto reciclado, llamados RM001 y RM003. El primer producto era únicamente concreto y el segundo permitió un 20% de RAP y un 15% de agregado producto de tabique. Además de estudiar ambos materiales, también evaluaron el comportamiento de la mezcla de ellos en varios porcentajes.

Uno de los primeros aspectos que Jayakody y sus colegas evaluaron fue el rompimiento de partículas. Ellos mostraron que, al compactar los materiales, el material RM001 presenta más rotura de partículas; y en cuanto a las mezclas, a medida que existe una mayor cantidad de material RM003, la rotura de partículas es menor.

Otro de los factores evaluados en esta investigación fue la influencia del tiempo de espera entre la mezcla material-agua y su compactación, además del tiempo de curado de los especímenes compactados. Esta revisión la llevaron a cabo con base en pruebas de CBR. Sus resultados indicaron que tres horas entre mezclado de material y compactación era adecuado; cuatro días era un tiempo adecuado para el curado de muestras compactadas. Basado en estos tiempos, prepararon muestras con contenido de agua óptimo para evaluar la resistencia en compresión no confinada; encontraron que la mayor resistencia a compresión simple estuvo en el material RM001 (450 kPa); a medida que incrementó el porcentaje de material RM003, la resistencia en compresión simple se degradó de forma importante; lo cual fue atribuido a la mayor cantidad de finos en el material (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Resultados de las pruebas de resistencia a compresión (Jayakody et ál. 2014)

Tipo de muestra	Resistencia a compresión (kPa)
RM1-100/RM3-0	450
RM1-80/RM3-20	436
RM1-60/RM3-40	381
RM1-40/RM3-60	323
RM1-20/RM3-80	301
RM1-0/RM3-100	277

En 2015, Aydilek reportó un estudio en el que evaluó el comportamiento de dos materiales granulares convencionales y dos agregados de concreto reciclado; los materiales provenían de bancos de materiales en Maryland. Las propiedades físicas tanto de los materiales convencionales como los RCA se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Propiedades físicas de los agregados convencionales y los RCA

Material	Propiedades físicas									pH	
	Compactación		Gs		Absorción (%)			LA (%)	MD (%)		SS (%)
	γ_{dmax} (kN/m ³)	W_{opt} (%)	Finos	Agregado grueso	Finos	Agregado grueso					
GAB1	24.84	4.7	2.55	2.77	5.33	0.78	16.4	22	1.6	6.7	
GAB2	24.84	4.5	2.72	2.83	0.55	0.55	23.6	7.6	1.1	8.5	
RCA-Planta A	20.20	9.5	2.29	2.49	9.23	4.20	55	17	15.7	11.8	
RCA-Planta B	20.09	9.5	2.29	2.53	9.05	4.19	47	18	14	10.4	

Nota: γ_d = Peso específico seco máximo; W_{opt} = contenido de agua óptimo; Gs = Gravedad específica; LA = Prueba de desgaste de los Ángeles; MD = Microdeval; y SS = Intemperismo con sulfato de sodio.

En esta investigación llevaron a cabo pruebas de CBR, módulo de resiliencia y deformación permanente (tanto para materiales tradicionales y RCA); así también, prepararon especímenes con mezclas de agregados tradicionales y RCA. Realizaron las pruebas de Mr en especímenes compactados en el óptimo de compactación y las ensayaron a 1, 7 y 28 días de curado.

De las pruebas de CBR, encontraron que el material GAB1 y GAB2 proporcionaron valores de 68 y 218%, respectivamente; mientras que el CBR del RCA del banco A dio 148% para muestra de un día de curado, se obtuvo 167 para la de 7 días. El RCA del banco B mostró valores de 114 y 131% para 1 y 7 días de curado. De esto concluyeron que a medida que el tiempo de curado se incrementa, el CBR también lo hace. Este efecto fue atribuido a la hidratación del cemento (Poon et ál., 2006, citado por Aydelek, 2015).

Con respecto al módulo de resiliencia, Aydilek (2015) indicó que la base GAB2 proporcionó los valores más bajos de M_r ; sin embargo, no obtuvieron mayores diferencias en el GAB1 y los dos agregados de concreto reciclado (Figura 2.8).

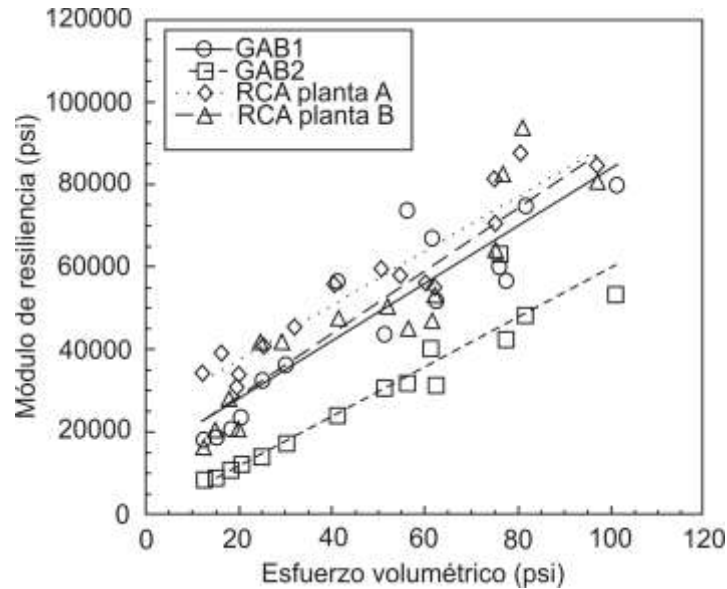


Figura 2.8. Comparativa de los resultados de módulo de resiliencia (de Aydilek, 2015).

En esta misma investigación, también llevaron a cabo pruebas de deformación permanente aplicando 10000 ciclos de carga con un esfuerzo desviador de 206.8 kPa y una presión de confinamiento de 103.4 kPa. Previo a la aplicación de los 10000 ciclos, el espécimen fue acondicionado con 500 ciclos con el estado de esfuerzos que indica la norma AASHTO T307-99. Los resultados de estas pruebas indicaron que el agregado producto de RCA presenta una deformación plástica superior a la del agregado natural (Figura 2.9). En la misma figura, se puede observar que al mezclar agregado tradicional con diferentes porcentajes de RCA, la deformación permanente se incrementa de forma importante.

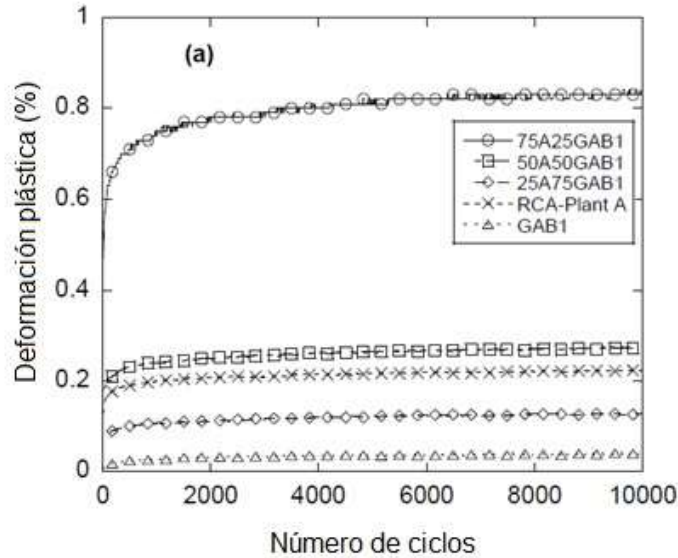


Figura 2.9. Resultados de las pruebas de deformación permanente (de Aydilek, 2015)

Blankenagel (2005) documentó un estudio de dos agregados producto de RCA, en Utah; uno de estos era producto de demolición de estructuras y el otro era agregado producto de concreto que había sido desechado a la hora del colado. Después de obtener el material, se llevaron a cabo varias pruebas; entre ellas, granulometría, CBR, determinación de curvas de compactación, evaluación de la resistencia a compresión no confinada a diferentes tiempos de curado, etc. Los resultados obtenidos indicaron que los finos de ambos materiales eran no plásticos y que la absorción estaba dentro de los rangos ya reportados por otros investigadores (5.2 y 6.5%, para agregado de concreto de demolición y agregado producto de sobrante de concreto). En cuanto a CBR, este presentó valores de 22 y 55% (RCA y de sobrante de concreto). Otro de los resultados contundentes de esta investigación fue la variación de la resistencia en compresión no confinada. Ambos materiales incrementaron su resistencia con el tiempo; sin embargo, el agregado producto de concreto sobrante presentó una mayor resistencia, lo que Blankenagel (2005) atribuyó a que era un agregado más fino (Figura 2.10).

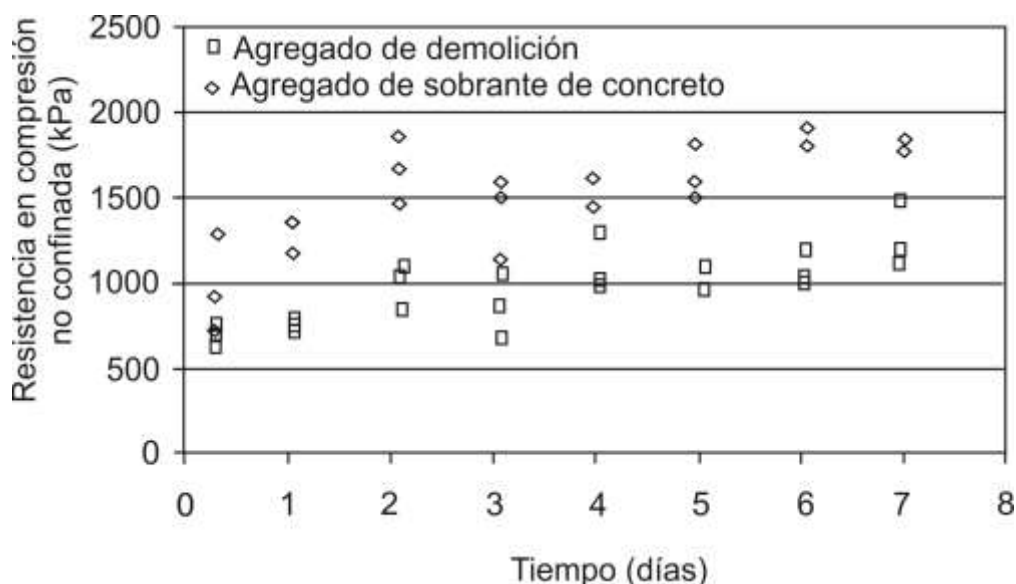


Figura 2.10. Evolución de la resistencia a compresión respecto al tiempo de curado

(Fuente: Blankenagel, 2005).

Como se observó en las investigaciones anteriores no existe una conclusión contundente en cuanto a las propiedades de los agregados de RCA; ya que en algunos de los trabajos encontraron, por ejemplo, que el módulo de resiliencia es mayor en agregado de RCA comparado con agregado tradicional; sin embargo, otras investigaciones muestran lo contrario. Son diversas variables las que han estudiado; no obstante, aún queda bastante por estudiar con respecto al comportamiento de los agregados producto de RCA.

2.3. Algunas especificaciones para uso de agregado de concreto reciclado en la construcción de carreteras

El uso de nuevos materiales en la construcción de carreteras requiere la formulación de las especificaciones de construcción y elaboración de procedimientos de prueba para controlar la calidad.

En la actualidad, cuando algunos organismos usan el agregado de RCA en alguna capa del pavimento, se le pide que cumpla con las mismas especificaciones de un material tradicional; por otro lado, existen otras agencias que aceptan usar el agregado de concreto reciclado sin pedir que cumplan con especificaciones. Asimismo, otros organismos han elaborado sus propias especificaciones, como muestra el siguiente inciso.

2.3.1. Especificaciones para agregado de RCA en algunas entidades de Estados Unidos

Chesner (2001) (citado por Cooley y Hornsby, 2012) preparó las especificaciones para el uso de agregado de concreto reciclado en capas no ligadas de un pavimento. Este documento fue adoptado como la norma AASHTO M319-02 (Agregado de concreto reciclado para capas de base suelo-agregado).

En el documento de Chesner (2001), analizan varios aspectos, entre ellos los siguientes:

- La compactación del material es crítica para el comportamiento
- El contenido de agua óptimo es mayor respecto a un agregado tradicional, ya que la absorción es más alta
- El control de la compactación del material es difícil, por lo que propone compactar el material hasta que ya no se logre un mayor acomodo del material
- El agua que fluye del concreto reciclado puede ser muy alcalina y tener un pH entre 11 y 12; lo cual puede corroer y dañar las alcantarillas de metal o los sistemas de drenaje
- Las capas de agregado de concreto reciclado incrementarán su resistencia con el tiempo (debido a la recementación del material fino). Chesner indica que, si el material es utilizado como capa drenante, debe retirarse la porción fina del material para evitar que la permeabilidad se reduzca
- Los agregados de RCA tendrán unos valores altos de intemperismo acelerado
- La última nota indica que debe asegurarse que el RCA no contenga materiales peligrosos, lo cual es más frecuente que se encuentre en productos de demolición de construcciones

Chesner también discute los requisitos en cuanto a granulometría del RCA, e indica que no hay evidencia de que la granulometría deba ser diferente a la que cumplen los materiales tradicionales. Recomienda que la granulometría cumpla con la especificada en la norma AASHTO M147 o ASTM D2940. La especificación también menciona que el RCA no debe tener más de 5% de agregado reciclado de concreto asfáltico o materiales producto de tabique.

Por su parte -basado en estudios de laboratorio, pruebas aceleradas con HVS y resultados de literatura- Kuo et ál. (2002) propusieron especificaciones para el uso de agregados de RCA como material de base para carreteras. La Tabla 2.4

muestra dichas especificaciones en conjunto con las especificaciones para agregado de base del Departamento de Transporte de Florida.

Tabla 2.4. Especificaciones propuestas para el RCA

Tipo de prueba	Especificación propuesta	Especificación del Departamento de Transporte de Florida para agregado de base
Granulometría	Límites (90% intervalo de confianza)	
Malla No.		
50 mm	Min 100 - Max 100	Min 100 - Max 100
37.5 mm	Min 98 - Max 100	Min 95 - Max 100
19 mm	Min 65 - Max 100	Min 65 - Max 900
9.5 mm	Min 40 - Max 83	Min 45 - Max 75
No. 4	Min 27 - Max 63	Min 35 - Max 65
No. 10	Min 20 - Max 49	Min 25 - Max 45
No. 50	Min 8 - Max 24	Min 5 - Max 25
No. 200	Min 2 - Max 6	Min 0 - Max 10
Prueba de LBR	Min 120	100
Desgaste de los Ángeles (FM 1-T104)	90% intervalo de confianza <48%	<45%
Prueba con sulfato de sodio (AASHTO T-104)	<50%	15%
Equivalente de arena (AASHTO T-176)	>70%	≥28%
Materiales pesados (EPA-96)	5 ppm	5 ppm
Asbestos (EPA-89)	Libre de asbestos	Sección 112 EPA
Contenido de agua óptimo (FM 5-521)	90% intervalo de confianza 10%-12%	No se especifica
Peso volumétrico seco máximo (FM 5-521)	90% intervalo de confianza 16.98 kN/m ³ -18.86 kN/m ³	98% del peso volumétrico seco máximo
Permeabilidad (FM 5-513)	0.10 a 1.40 ft/day	No se especifica
Impurezas (FM 1 T-194)	<2% en peso	Substancialmente libre de impurezas
Coefficiente estructural	0.30	0.15
Espesor requerido	20.4 cm	20.4 cm

A este respecto, el Departamento de Transporte de Minnesota tiene como requisitos para las bases granulares densas, lo indicado en las Tablas 2.5 y 2.6. Cabe señalar que estos requisitos son los mismos para bases de agregado natural (21AA, 21A, o 22A) (Van Dam et ál., 2011).

Tabla 2.5. Granulometrías para bases granulares densas

Clase de agregado	Análisis granulométrico (MTM 109)							
	Porcentaje que pasa							
	1 1/2	1 in	¾ in	½ in	3/8 in	No. 4	No. 8	No. 200 (pérdida por lavado)
21AA	100	85-100		50-75			20-45	4-8
21A		100	90-100		65-85		30-50	4-8
22A		100			60-85		25-60	9-16

Tabla 2.6. Requisitos físicos adicionales para las bases granulares densas

Clase de agregado	Material triturado, % mínimo (MTM 110, 117)	Pérdida, % máximo. Prueba de desgaste de los Ángeles (MTM 102)
21AA	95	50
21A	25	50
22A	25	50

En el caso de que el agregado de concreto reciclado sea usado como capa drenante de granulometría abierta, el mismo departamento indica que debe cumplir los requisitos de la clase 4G. Aunque en las especificaciones de 2012 no sea indicada la granulometría, hay que tomar en cuenta la provisión especial 03SP303(A). Para el caso de capa drenante de granulometría abierta pero modificada (Clase 4G), se debe cumplir con los requisitos de la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Granulometrías para agregados de granulometría abierta. Capa drenante abierta y modificada

Clase de agregado	Análisis granulométrico (MTM 109)						
	Porcentaje que pasa						
	1 1/2	1 in	3/4 in	1/2 in	No. 8	No. 30	No. 200 (pérdida por lavado)
4G: Antes de colocarse	100	85-10		45-65	15-30	6-18	6 max
4G: En el lugar	100	85-100	60-80	45-70	15-35	8-22	8 max
Requisitos físicos adicionales							
Material triturado, %min (MTM 110, 117)							95
Desgaste en prueba de Los Ángeles (MTM 102)							45

En Mississippi, el RCA usado como agregado está gobernado por una Provisión Especial de especificaciones para caminos y puentes de ese estado. En la provisión (No. 907-703-10, de fecha junio 2012) el RCA es definido como: concreto reciclado de pavimento, de estructura de concreto o de otras fuentes; que puede ser disgregado para cumplir con los requisitos de granulometría para tamaño 825B. En ningún caso, el desperdicio de la producción de concreto (agregado lavado) debe ser utilizado como material granular de base. La provisión también especifica que la cantidad de material que pasa la malla No. 200 debe estar entre 2 y 18 %. Además, debe cumplir con otras propiedades; por ejemplo, la cantidad de material más grueso que la malla No. 8 debe tener un porcentaje de desgaste de Los Ángeles menor a 45% y un peso volumétrico seco suelto de 70 pcf. La parte fina (más que la malla No. 8) debe ser no plástica (Cooley y Hornsby. 2012).

En Dakota del Sur, el material y los requisitos de construcción para capas granulares de base están determinados en la sección 882 y 260 de las

especificaciones estándar de 2004 para construcción de caminos y puentes. En la sección 882 no está permitido el uso de agregado de concreto reciclado; sin embargo, están realizando investigaciones para determinar su potencial como material de construcción en carreteras (Cooley et ál., 2007).

3 Materiales, equipo y procedimientos de prueba

3.1. Descripción de los materiales utilizados

La empresa PRECOVA ofrece servicios de reciclaje de residuos generados en la construcción. Todos los residuos recibidos en esta empresa son triturados y clasificados para venderlos con diferentes propósitos (Figura 3.1). El material utilizado en el presente estudio corresponde a un agregado con tamaño máximo de una pulgada.



Figura 3.1. Planta PRECOVA de materiales reciclados

Para llevar a cabo el estudio, la empresa PRECOVA envió 14 m³ de concreto reciclado al Instituto Mexicano del Transporte (Figura 3.2a y b).



Figura 3.2. (a) Concreto reciclado

En la investigación, se utilizó material que pasa la malla de una pulgada (25.4 mm); por lo tanto, el material enviado fue cribado y se descartó todo el sobretamaño. Después del cribado, el material se cuarteó a tamaño de 50 kg aproximadamente y se almacenó (Figura 3.3).



Figura 3.3. (a) Material retenido en la malla de una pulgada; (b) Cuarteo del material a tamaño de 50 kg aproximadamente

3.2. Procedimientos para determinar propiedades índice de los materiales

Después del cuarteo, el agregado de concreto reciclado se sometió a las pruebas indicadas en la Tabla 3.1, para determinar sus propiedades índice.

Tabla 3.1. Normativa utilizada para caracterizar el concreto reciclado

Designación de la norma	Nombre de la norma
ASTM C702-11	Reducción de agregados
ASTM C136-06	Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos
ASTM D854-10	Determinación de la gravedad específica de suelo, usando picnómetro con agua
ASTM C127-12	Método estándar para determinar la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso.
ASTM C131-14	Método de prueba estándar para determinar la resistencia a la degradación de agregado grueso de tamaño pequeño, por abrasión, en la máquina de los Ángeles.
ASTM D4791-10	Método de prueba estándar para la determinación de partículas planas, alargadas o planas y alargadas de agregado grueso.
ASTM D2419-14	Método estándar para determinar el valor del equivalente de arena en suelos y agregado fino.

3.3. Características de compactación del agregado de concreto reciclado

En este trabajo se determinó la curva de compactación Proctor modificada (de acuerdo con el procedimiento ASTM D1557-12) para obtener el peso volumétrico seco máximo y contenido de agua óptimo. Estas características fueron utilizadas para controlar la fabricación de los especímenes.

3.4. Equipo triaxial utilizado en la determinación de propiedades mecánicas

El equipo triaxial cíclico utilizado en este proyecto está compuesto básicamente de tres unidades (ver Figura 3.4):

- a) Unidad de aplicación de carga
- b) Unidad de regulación de presión
- c) Unidad de registro de información



(a)



(b)

Figura 3.4. Unidades que componen el equipo triaxial cíclico. (a) Unidad de aplicación de carga; (b) Unidad de regulación de presión de aire y sistema de adquisición de datos

Unidad de aplicación de carga

La unidad de aplicación de carga consta de un marco de carga y una cámara triaxial. El marco de carga está formado por dos columnas con rosca para el ajuste de la viga de reacción. Incluye un pistón hidráulico montado en la viga de reacción con capacidad de 10 toneladas y un LVDT de 50 mm de carrera. Por su parte, la cámara triaxial está constituida de una base de acero inoxidable, una celda de lucita transparente y una tapa de acero inoxidable. En esta celda es posible ensayar especímenes de 10 y 15 cm de diámetro.

La medición de la carga axial se efectúa con una celda de carga localizada entre la parte superior de la cámara triaxial y la viga de reacción; su capacidad es de 5 toneladas. Los desplazamientos axiales son medidos con tres sensores o LVDT (Linear Variable Differential Transformers), que transmiten la magnitud de dichos desplazamientos a la unidad de registro y control de información. Estos elementos están localizados en la parte externa de la cámara triaxial; dos de ellos son colocados sobre la tapa de la cámara triaxial y otro, en la parte superior de la viga de reacción.

Algunas de las características de los transductores o sensores utilizados para la medición de carga axial, deformación axial y presión de confinamiento son:

- Celda de carga con una capacidad de 5 toneladas

- Sensor de desplazamiento axial (LVDT 3) con un rango de ± 50 mm
- Sensores de desplazamiento axial (LVDT 1 y 2) con un rango de ± 1.25 mm. Con estos sensores realizamos las mediciones de los desplazamientos de la muestra, puesto que tienen una mayor sensibilidad o precisión

Unidad de regulación de presión

Esta unidad consta de un panel con válvulas reguladoras de presiones de confinamiento y de vacío. En esta unidad, regulamos automáticamente el aire comprimido que aplica las presiones necesarias para la ejecución de los ensayos triaxiales. El panel incluye tres reguladores de presión para el control manual de presiones con 1 kPa de precisión, válvula seleccionadora y bomba de vacío tipo venturi.

Unidad de control y adquisición de datos

Esta unidad contiene los controles que permiten accionar electrónicamente el equipo, para que opere y registre la información generada durante la ejecución de los ensayos. La unidad controla la adquisición de datos mediante un programa que tiene integrado (C.A.T.S.).

3.5. Procedimientos de prueba para módulo de resiliencia, deformación permanente y resistencia en compresión confinada y no confinada

3.5.1. Preparación de los especímenes de prueba

Las pruebas de módulo de resiliencia, deformación permanente, compresión confinada y no confinada fueron hechas para diferentes tiempos de curado (0, 7 y 28 días).

Los pasos seguidos para la elaboración de los especímenes sin tiempo de curado fueron los siguientes:

1. Mezclado del agregado de concreto reciclado con la cantidad de agua necesaria para alcanzar el contenido de agua óptimo y posterior almacenamiento, durante 24 horas, para obtener contenido de agua uniforme en toda la muestra (Figura 3.5a).
2. Colocación de membrana y molde de compactación en la base de la celda triaxial (Figura 3.5b). La muestra fue compactada en un molde de 30 cm de

altura y 15 cm de diámetro. Para llevar a cabo la compactación, se utilizó un pisón de 4.5 kg de masa y 45.7 cm de altura de caída. Se calculó la cantidad de material por compactar en cada capa (6 capas); para compactar el material de cada capa, se aplicaron 80 golpes (Figura 3.5c).

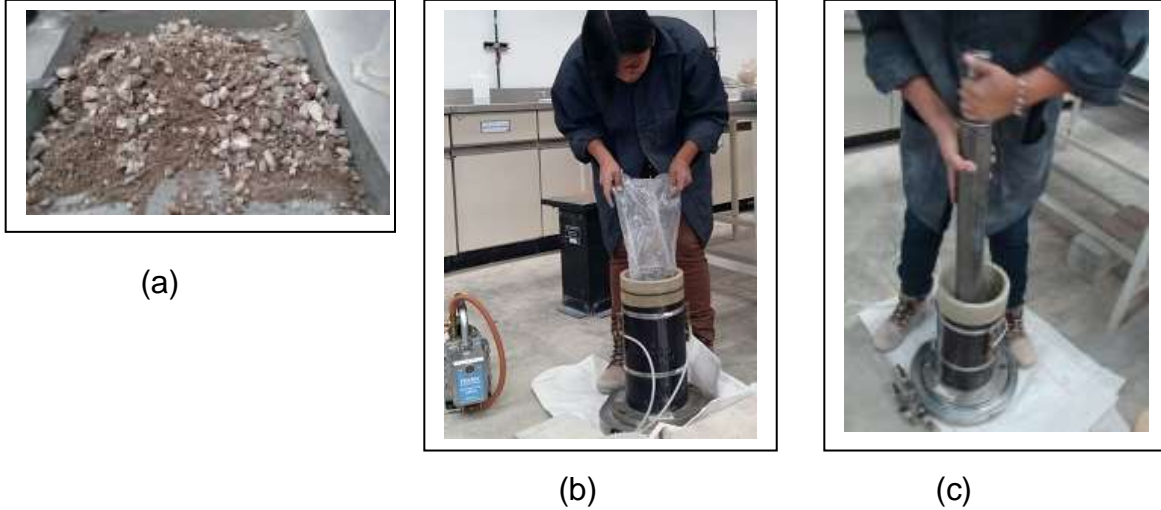


Figura 3.5. (a) Mezclado del agregado de concreto reciclado con el agua de compactación; (b) Molde de compactación y membrana de latex colocadas en la base de la cámara triaxial y, (c) Compactación del espécimen.

3. Después de compactar la última capa, se niveló la superficie (Figura 3.6a y b), se colocó el cabezal superior y la membrana se selló con O-rings en ambos cabezales (Figura 3.6c).

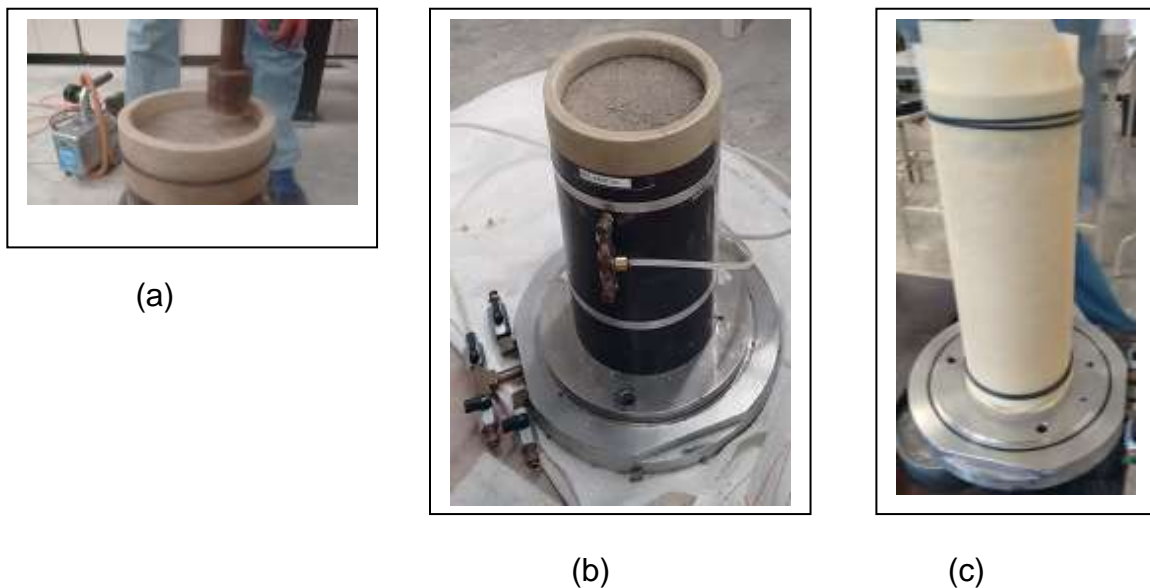


Figura 3.6. (a) Nivelado de la superficie de la muestra; (b) Muestra compactada; (c) Sellado de la membrana en los cabezales

4. A continuación, se ensambló la celda triaxial y se colocó en el marco de carga para llevar a cabo la prueba correspondiente (Figura 3.7).



Figura 3.7. Muestra de agregado de concreto reciclado colocada en equipo triaxial.

El procedimiento anterior corresponde a las muestras que se ensayaron inmediatamente después de compactarse. En el caso de las muestras con tiempo de curado, éstas fueron compactadas en un molde diferente ya que a medida que pasa el tiempo de curado, los especímenes muestran cierto grado de cohesión; lo que permite que la muestra pueda ser manipulada para colocarse en el equipo triaxial. El procedimiento de compactación de estos especímenes fue el siguiente:

1. Como en el caso anterior, se mezcló el agregado de concreto reciclado con el agua de compactación y se almacenó durante 24 horas.
2. El equipo utilizado para la compactación consta de un molde metálico bipartido (15 cm de diámetro por 30 cm de altura) unido por un collarín en la parte superior y, en la parte inferior, a una placa base de acero (Figura 3.8). Un pisón de 4.5 kg de masa y 45.7 cm de altura de caída forma parte del equipo de compactación.

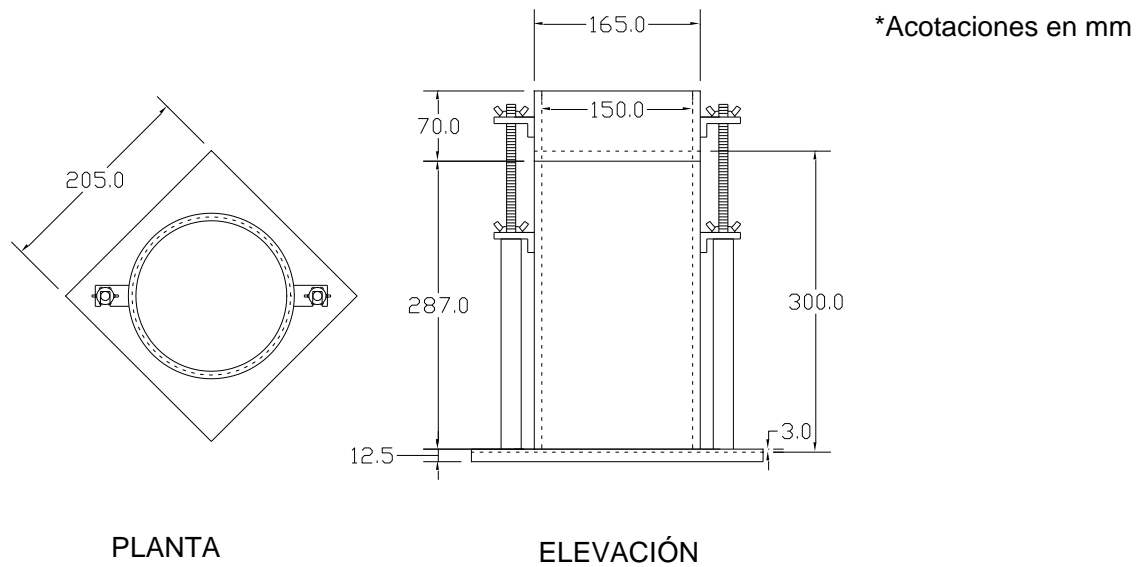


Figura 3.8. Molde de compactación para especímenes de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura.

3. 24 horas después de haber preparado la mezcla agregado-agua, se compactó la probeta. Para esto, en la pared interior del molde se colocó mica para evitar que el material se adhiriera a las paredes del molde dificultando la extracción del espécimen.
4. Se pesó la cantidad de material de cada capa. Se vertió el material de la primera capa en el molde y se compactó con el pisón de 4.5 kg de masa (Figura 3.9a). El número de golpes aplicado en cada capa fue de 80.
5. Después de compactar la sexta capa, el espécimen se enrasó y se tomó el peso de molde más muestra y se almacenó en el cuarto de curado.



Figura 3.9. (a) Compactación en molde; (b) Enrase de la superficie de la muestra y; (c) Muestra colocada en el cuarto de curado.

6. Después de que la muestra cumplió el tiempo de curado especificado, fue colocada en el equipo triaxial para llevar a cabo la prueba correspondiente.

3.5.2. Prueba de módulo de resiliencia

Para llevar a cabo la prueba de módulo de resiliencia, se siguió el procedimiento indicado en el protocolo NCHRP 1-28A. Este protocolo indica que las muestras de material granular de base deben someterse a 30 secuencias de carga cíclica (Tabla 3.2). En la primera secuencia (acondicionamiento) se aplican 1000 ciclos de carga con un esfuerzo de 207 kPa y un confinamiento de 103.5 kPa; en esta fase de la prueba no se registran datos. En las secuencias posteriores, en cada secuencia se aplican 100 ciclos de carga cíclica pero solo se registran los datos de los últimos cinco ciclos; con estos datos se determina un valor de módulo de resiliencia promedio.

En este protocolo la carga se aplica con una señal tipo haversine en donde el tiempo de carga es de 0.1 de segundo y el tiempo de retraso es de 0.9 de segundo.

Tabla 3.2. Secuencias de carga aplicadas en la prueba de módulo de resiliencia para un material de base o subbase, de acuerdo con el protocolo NCHRP 1-28A

Procedimiento Ia. (Materiales para Base/Subbase)					
	Presión de confinamiento	Esfuerzo de contacto	Esfuerzo cíclico	Esfuerzo máximo	
	kPa	kPa	kPa	kPa	
0	103.5	20.7	207.0	227.7	1000
1	20.7	4.1	10.4	14.5	100
2	41.4	8.3	20.7	29.0	100
3	69.0	13.8	34.5	48.3	100
4	103.5	20.7	51.8	72.5	100
5	138.0	27.6	69.0	96.6	100
6	20.7	4.1	20.7	24.8	100
7	41.4	8.3	41.4	49.7	100
8	69.0	13.8	69.0	82.8	100
9	103.5	20.7	103.5	124.2	100
10	138.0	27.6	138.0	165.6	100
11	20.7	4.1	41.4	45.5	100
12	41.4	8.3	82.8	91.1	100
13	69.0	13.8	138.0	151.8	100
14	103.5	20.7	207.0	227.7	100
15	138.0	27.6	276.0	303.6	100
16	20.7	4.1	62.1	66.2	100
17	41.4	8.3	124.2	132.5	100
18	69.0	13.8	207.0	220.8	100
19	103.5	20.7	310.5	331.2	100
20	138.0	27.6	414.0	441.6	100
21	20.7	4.1	103.5	107.6	100
22	41.4	8.3	207.0	215.3	100
23	69.0	13.8	345.0	358.8	100
24	103.5	20.7	517.5	538.2	100
25	138.0	27.6	690.0	717.6	100
26	20.7	4.1	144.9	149.0	100
27	41.4	8.3	289.8	298.1	100
28	69.0	13.8	483.0	496.8	100
29	103.5	20.7	724.5	745.2	100
30	138.0	27.6	966.0	993.6	100

Al finalizar la prueba, se reduce la presión de confinamiento a cero y se retira la muestra de la cámara triaxial. Se disgrega el espécimen y se toman tres muestras para determinar el contenido de agua final.

3.5.3. Prueba de compresión con y sin confinamiento

Otras de las propiedades importantes por evaluar en los agregados de concreto reciclado son sus parámetros de resistencia al esfuerzo cortante c y ϕ . Para determinarlos, se llevaron a cabo pruebas con confinamiento de 0, 50, 100, 200 y 300 kPa. La velocidad de aplicación de la carga fue de 1.2%/min (3.6 mm/min).

En estas pruebas, al observar la falla, se detiene el ensaye y se desensambla la celda triaxial; se extrae la muestra y se disgrega para determinar su contenido de agua.

3.5.4. Prueba de deformación permanente

Para las pruebas de deformación permanente no existe un procedimiento definido; por tanto, en la primera prueba realizó, al espécimen se le aplicaron 20,000 ciclos de carga cíclica con un esfuerzo de 966 kPa y un confinamiento de 20.7 kPa (máximo esfuerzo desviador aplicado en la prueba de módulo de resiliencia y confinamiento mínimo); sin embargo, después de haber aplicado los primeros ciclos de carga, la muestra falló. En consecuencia, se cambió el nivel de carga a 310 kPa y una presión de confinamiento de 69 kPa. En cuanto a ciclos de carga, algunas pruebas se llevaron a cabo a 20 000 ciclos y otras a 250 000 ciclos.

4 Resultados

4.1. Introducción

La investigación presentada en este documento está enfocada principalmente a las propiedades de un agregado de concreto reciclado; sin embargo, para poder comparar las propiedades de este material, se decidió ensayar también un material granular tradicional. Los resultados obtenidos y las comparativas aparecen en los siguientes incisos.

4.2. Propiedades índice

En la Tabla 4.1 se resumen las propiedades índice del agregado de concreto reciclado y del material de base de agregado natural. En la misma tabla se indican las especificaciones para bases de pavimentos asfálticos de acuerdo con la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. De estos resultados se observa que tanto el agregado de concreto reciclado como el tradicional no presentan plasticidad; el agregado de concreto reciclado no cumple con desgaste de Los Ángeles para ambos tipos de tránsito, como ya se ha reportado en la literatura. Por su parte, el agregado tradicional presenta un valor de desgaste bajo.

Tabla 4.1. Resumen de las propiedades índice de los materiales estudiados.

Propiedad	Norma N.CMT.4.02.002/04		Valor obtenido	Valor obtenido
	$\Sigma L \leq 10^6$	$\Sigma L \geq 10^6$	RCA	Agregado natural
Límite líquido (%), máximo	25	25	NP	NP
Índice plástico (%), máximo	6	6	NP	NP
Equivalente de arena, mínimo	40	50	---	37
Desgaste de los Ángeles, máximo	35	30	39	18
Partículas alargadas y lajeadas, máximo	40	35	---	---

Además de las propiedades anteriores, se determinaron las densidades del agregado grueso, del fino y la absorción del primero. La Tabla 4.2 indica densidades más altas para el agregado natural, excepto la densidad del agregado fino; la cual es menor para el material de base natural. Con respecto a la absorción -y como ya fue reportado en la literatura- esta es mayor en el agregado de concreto reciclado.

Tabla 4.2. Densidades y absorciones de los materiales estudiados.

Propiedad	Agregado de concreto reciclado	Agregado tradicional
Peso específico relativo de sólidos de los finos, G_s	2.62	2.54
G_{sb}	2.06	2.37
G_{ss}	2.26	2.49
G_{sa}	2.57	2.69
Absorción (%)	9.5	5.17

4.3. Granulometría

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), en la norma N.CMT.4.02.002/04, especifica que los materiales usados en bases deben cumplir con características granulométricas dependiendo del tipo de pavimento y de nivel de tránsito de diseño. La Figura 4.1 muestra las curvas granulométricas de los materiales estudiados en esta investigación; de igual manera, aparecen las curvas granulométricas límite para bases de pavimentos de carpetas de mezcla asfáltica, de granulometría densa.

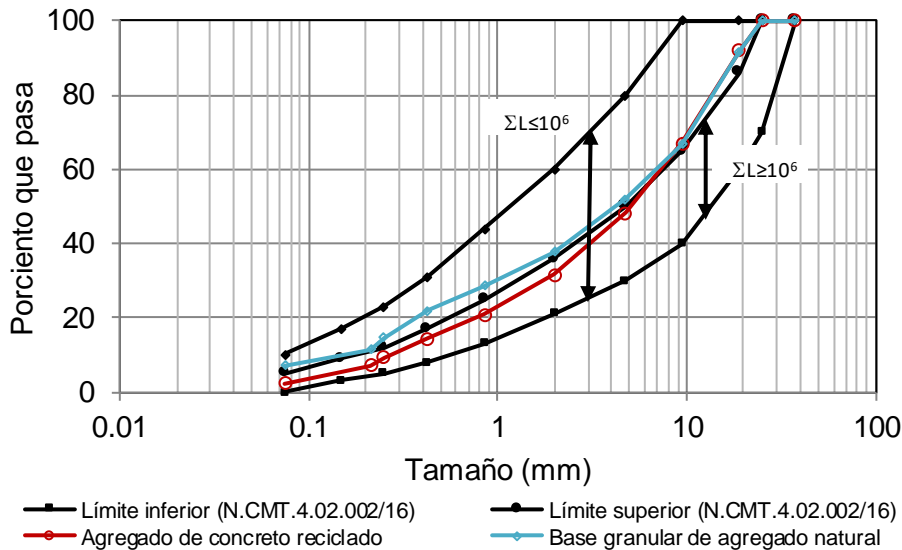


Figura 4.1. Curvas granulométricas de los agregados.

En la Figura 4.1 se puede observar que los dos agregados cumplen para un tránsito menor de un millón de ejes equivalentes. Por otro lado, la mayor parte de la curva granulométrica está dentro de la zona especificada para tránsito mayor a un millón de ejes equivalentes, solo está fuera para tamaño de partícula mayor a 10 mm.

4.4. Curvas de compactación

Las curvas de compactación del material son de importancia fundamental, ya que el contenido de agua óptimo y el peso volumétrico seco máximo son valores necesarios para la preparación de los especímenes para determinar las propiedades mecánicas. La Figura 4.2 muestra las curvas de compactación Proctor modificada del agregado de concreto reciclado y de la base granular natural. Estas curvas fueron obtenidas tomando como base la norma ASTM D1557-12.

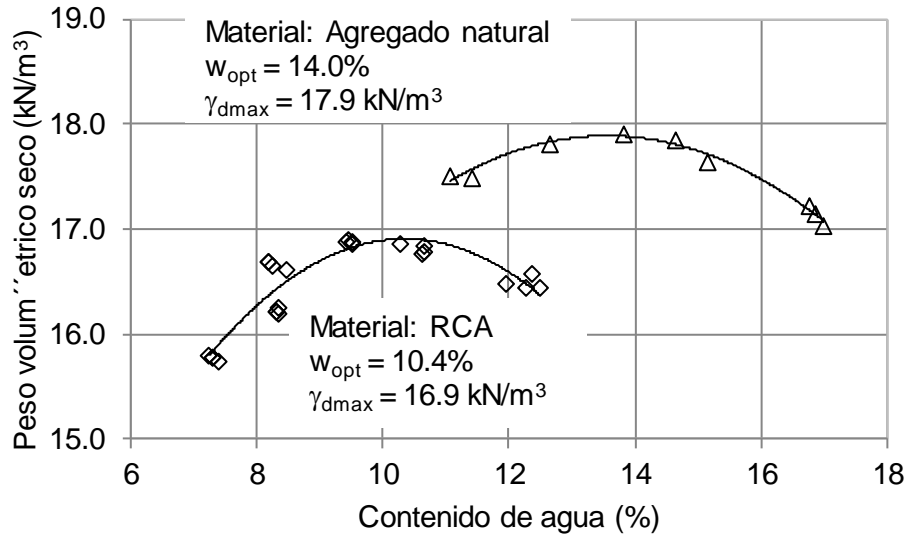


Figura 4.2. Curvas de compactación Proctor modificada del agregado de concreto reciclado y agregado natural.

Las condiciones óptimas de compactación ($w_{opt} = 10.4\%$, 14.0% y $\gamma_{dmax} = 16.9$ y 17.9 kN/m^3) fueron las condiciones de control de compactación de los especímenes para las pruebas mecánicas. Cabe señalar que el más estricto control de laboratorio no asegura que los contenidos de agua y pesos volumétricos sean iguales en todas las muestras; por lo tanto, para aceptar las muestras como similares se permitió una variación de $\pm 0.5\%$ en contenido de agua y $\pm 1\%$ en peso volumétrico seco.

4.5. Pruebas de módulo de resiliencia

El módulo de resiliencia fue determinado en tres o más réplicas ensayadas inmediatamente después de compactarse. En la siguiente Tabla 4.3 se resumen las características de estos especímenes.

Tabla 4.3. Características de los especímenes ensayados en módulo de resiliencia

Tipo de material	Especimen No.	d _{prom} , cm	h _{prom} , cm	Peso, g	w (%)	γ _d (kN/m ³)
	MO1	15	30	10200	10.10	17.19
	MO2	15	30	10200	10.07	17.15
	MO3	15	30	10200	10.20	17.12
	MO4	15	30	10200	10.05	17.14
	1	15	30	11160	14.03	18.11
	2	15	30	11160	14.40	18.05
	3	15	30	11160	14.28	18.07

Los resultados de módulo de resiliencia del agregado de concreto reciclado y de la base granular natural se resumen en la Tabla 4.4 y 4.6. Las Tablas 4.5 y 4.7 indican los valores promedio de M_r así como los coeficientes de variación observados en cada secuencia.

Tabla 4.4. Módulos de resiliencia del agregado de concreto reciclado

Secuencia	Ensayo 1				Ensayo 2			Ensayo 3			Ensayo 4		
	σ _s , kPa	σ _d , kPa	θ, kPa	M _r , MPa	σ _d , kPa	θ, kPa	M _r , MPa	σ _d , kPa	θ, kPa	M _r , MPa	σ _d , kPa	θ, kPa	M _r , MPa
3	21	6	68	368	6	68	282	6	68	105	6	68	107
4	21	26	88	203	30	92	315	18	80	112	19	81	114
5	21	62	124	301	67	129	182	67	129	122	54	117	112
8	41	46	170	238	58	182	262	49	173	172	49	173	164
9	41	103	227	244	100	224	260	102	226	188	97	221	179
10	41	142	266	271	141	265	282	142	266	203	137	261	196
12	41	290	415	269	292	416	283	287	411	233	285	409	229
13	69	34	241	272	37	244	389	39	246	243	39	246	229
14	69	78	285	284	75	282	340	84	291	242	84	291	228
15	69	163	370	327	162	369	347	161	368	271	159	366	265
17	69	351	558	369	351	558	383	346	553	310	349	556	324
18	69	477	684	378	474	681	387	471	678	335	474	681	351
19	104	50	360	344	59	369	510	58	368	329	58	369	310
20	104	123	434	383	113	424	404	123	434	332	125	435	316
23	104	509	820	439	509	819	466	503	814	393	508	819	430
24	104	700	1010	467	697	1007	470	692	1003	426	696	1006	466
25	138	66	480	434	81	495	572	76	490	422	76	490	397
26	138	174	588	499	174	588	542	161	575	427	162	576	409
27	138	294	708	516	296	710	551	293	707	448	294	708	464
28	138	422	836	498	418	832	542	414	828	452	419	833	487
29	138	667	1081	502	667	1081	522	659	1073	472	665	1079	510
30	138	918	1332	516	917	1331	522	910	1324	505	914	1328	548

Tabla 4.5. Valores promedio de M_r y coeficientes de variación en cada secuencia

Secuencia	Valores promedio		Desviación estándar, MPa	Coeficiente de variación, %
	θ , kPa	M_r , MPa		
3	68	216	131	61
4	85	186	96	52
5	125	179	87	48
8	175	209	48	23
9	225	218	40	19
10	265	238	45	19
12	413	253	27	11
13	244	283	73	26
14	287	274	50	18
15	368	302	41	13
17	556	347	35	10
18	681	363	24	7
19	367	373	92	25
20	432	359	41	12
23	818	432	30	7
24	1007	458	21	5
25	489	456	78	17
26	582	469	62	13
27	708	494	47	10
28	832	495	37	7
29	1079	502	21	4
30	1329	523	18	4

Tabla 4.6. Módulos de resiliencia de la base granular natural

Secuencia	Ensayo 1				Ensayo 2			Ensayo 3		
	σ_3 , kPa	σ_d , kPa	θ , kPa	M_r , MPa	σ_d , kPa	θ , kPa	M_r , MPa	σ_d , kPa	θ , kPa	M_r , MPa
2	21	4	66	125	4	66	123	3	65	120
4	21	4	66	132	6	69	117	6	69	80
5	21	43	105	108	38	100	112	32	94	96
8	41	36	161	156	43	167	157	40	164	125
9	41	82	206	169	77	201	160	77	201	140
10	41	113	237	176	108	232	168	119	243	156
13	69	30	237	223	35	242	222	34	241	171
14	69	67	274	218	74	281	204	74	281	183
15	69	141	348	250	148	355	233	147	354	217
17	69	294	501	265	313	520	269	305	512	246
19	104	48	359	292	53	364	273	53	364	236
20	104	103	414	302	114	424	274	115	425	259
22	104	283	594	333	296	607	324	292	602	305

Tabla 4.7. Valores promedio de M_r y coeficientes de variación para la base granular natural

Secuencia	Valores promedio		Desviación estándar, MPa	Coeficiente de variación, %
	θ , kPa	M_r , MPa		
2	66	123	3	2
4	68	110	27	24
5	100	106	8	8
8	164	146	18	12
9	203	156	14	9
10	238	167	10	6
13	240	205	30	15
14	279	202	18	9
15	353	233	16	7
17	511	260	13	5
19	362	267	29	11
20	421	279	22	8
22	601	320	15	8

De los resultados anteriores se concluye –primeramente- que no todas las 30 secuencias se listaron en los resultados. Esto se debe a que en los niveles de carga más bajos (la carga más baja era aproximadamente 20 kg), la sensibilidad tanto de la celda como la de los sensores de desplazamiento no fue adecuada; por tanto, la información registrada en esos ciclos fue considerada como ruido electrónico.

Por otro lado, es claro que los coeficientes de variación más altos -en el caso de las muestras de agregado concreto reciclado- se presentan para esfuerzos desviadores más bajos. Además, es importante notar que el rango del coeficiente de variación es muy amplio; en este caso, se encuentra entre 4 y 61%. Para la base granular natural, el coeficiente de variación es menor; lo que podría deberse a que es un material más homogéneo con respecto al agregado concreto reciclado.

En la Figura 4.3 se grafican los valores promedio de M_r de las muestras de agregado de concreto reciclado y de la base granular. La figura indica, por un lado, valores de M_r ligeramente mayores para las muestras de agregado de concreto reciclado, pero, además, el material sí soporta los mayores esfuerzos requeridos en la prueba de módulo de resiliencia. No así la base granular natural, en la que solamente se pudo desarrollar la prueba hasta niveles de esfuerzo desviador inferiores a 300 kPa. Por lo tanto, desde el punto de vista módulo de resiliencia, el agregado de concreto reciclado parece ser un material con mayor rigidez.

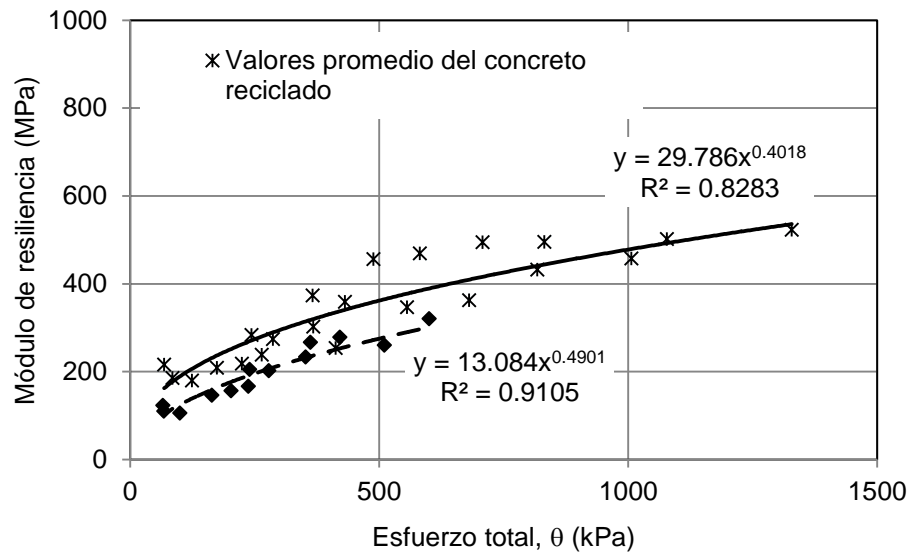


Figura 4.3. Comparativa de los valores de módulo de resiliencia para la base granular y el agregado de concreto reciclado.

4.6. Pruebas de deformación permanente

La deformación permanente es otro de los parámetros de importancia en los pavimentos. Esta característica, aun cuando ha sido estudiada por varios investigadores no cuenta con un estándar para su determinación.

En esta investigación se determinó la deformación permanente de muestras de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Al inicio de la investigación, al espécimen se le aplicó un confinamiento de 20.5 kPa (mínimo aplicado en la prueba de M_r de bases granulares) y un esfuerzo desviador de 966 kPa (máximo de la secuencia de M_r). Bajo este estado de esfuerzos, las probetas se deformaron completamente en los primeros ciclos de carga, por lo tanto, se decidió cambiar el estado de esfuerzos a 69 kPa de confinamiento y 310 kPa de esfuerzo desviador.

Con respecto a número de ciclos aplicados, algunos especímenes se sometieron a 20 000 ciclos de carga y otros a 250 000 ciclos. El propósito de aplicar 250 000 ciclos fue determinar cuánta deformación permanente se seguía acumulando en una probeta después de haberle aplicado 20 000 ciclos.

4.6.1. Curva típica de una prueba de deformación permanente

De las pruebas de deformación permanente se obtiene una curva como la mostrada en la Figura 4.4. En esta curva se pueden observar la deformación permanente y la deformación recuperable del espécimen de prueba.

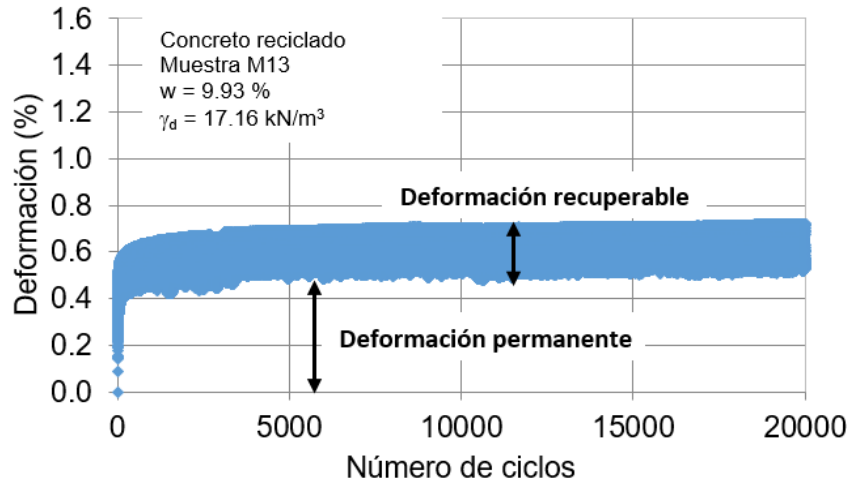


Figura 4.4. Curva típica de una prueba de deformación permanente.

Como es conocido, la deformación recuperable en todos los ciclos de carga también puede determinar la evolución del módulo de resiliencia.

4.6.2. Resultados de deformación en agregado de concreto reciclado

Para el agregado de concreto reciclado, se compactaron tres muestras en las condiciones óptimas de compactación y se ensayaron en la prueba de deformación, inmediatamente; en estas muestras, se aplicó la carga durante 20 000 ciclos. La Figura 4.5 muestra los resultados de deformación, y a un costado se tiene la curva de la evolución de los módulos de resiliencia con el número de ciclos aplicados.

Los resultados indican que la deformación se acumula rápidamente en los primeros ciclos de carga. En este caso, en los primeros 1000 ciclos ya se ha presentado la mayor parte de la deformación permanente; por lo que, de igual forma, el módulo de resiliencia se mantiene aproximadamente en un valor constante de 200 MPa para las tres muestras ensayadas. En la muestra 18 se observó dispersión importante en los módulos de resiliencia; sin embargo, el valor promedio se encuentra cerca del valor mencionado.

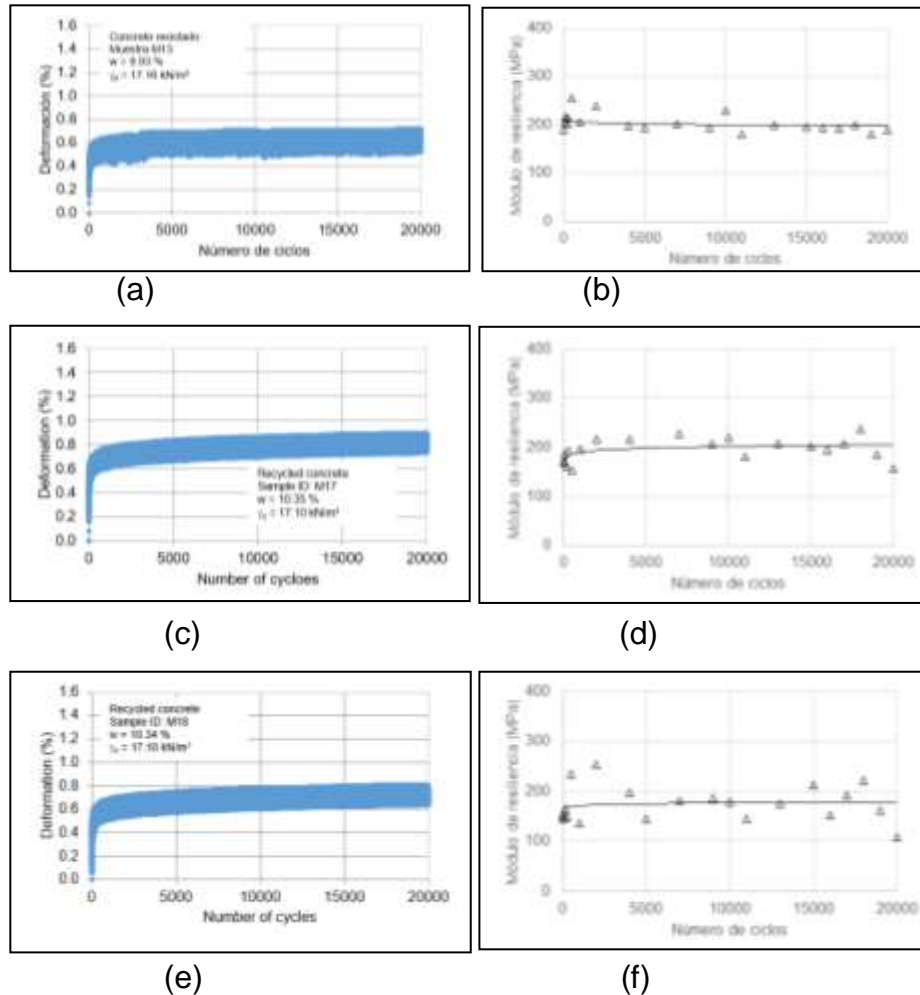


Figura 4.5. Pruebas de deformación y módulos de resiliencia en muestras de agregado de concreto reciclado.

Las pruebas con especímenes ensayados a 250 000 ciclos indicaron, de igual manera, que la deformación permanente se acumula rápidamente en los primeros ciclos de carga (Figura 4.6). En las pruebas a 20 000 ciclos se observa que al final se tiene una deformación permanente promedio de 0.58% mientras que, en las pruebas a 250 000 ciclos, existe una deformación permanente cercana al 0.85%; por lo tanto, el material continúa acumulando deformación permanente después de 20 000 ciclos.

Por otro lado, al inicio, las muestras indican un módulo de resiliencia de aproximadamente 200 MPa, la que con el tiempo se va incrementando hasta valores cercanos a 300 MPa; por lo tanto, no se mantiene constante como lo indica una prueba a 20 000 ciclos.

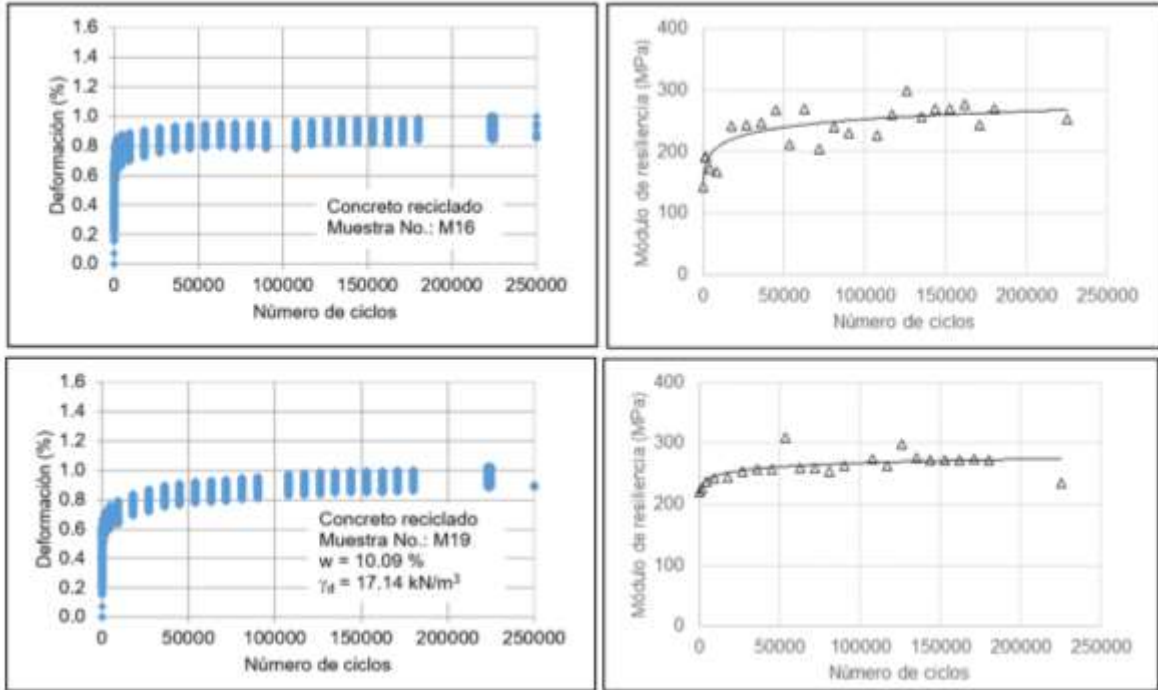


Figura 4.6. Pruebas de deformación a 250 000 ciclos en muestras de agregado de concreto reciclado y módulos de resiliencia.

4.6.3. Resultados de deformación en agregado tradicional

Al igual que con las muestras de agregado de concreto reciclado, la prueba a 20000 ciclos indica una deformación permanente de aproximadamente 0.4 % (Figura 4.7), que parece inferior a la indicada en el concreto reciclado; sin embargo, para este agregado faltó ensayar más muestras para asegurar que efectivamente éste era el comportamiento.

Con respecto a módulos de resiliencia, la prueba de 20 000 ciclos indica un módulo de aproximadamente 100 MPa, que sí es inferior al indicado en concreto reciclado; esto probablemente se deba a la mayor angularidad que tiene el agregado de concreto reciclado. Por otro lado, llama la atención que la deformación recuperable en una base tradicional sea mayor a la del concreto reciclado, lo cual trae como consecuencia un módulo de resiliencia inferior, que además se mantiene constante en una prueba de largo plazo (Figura 4.7).

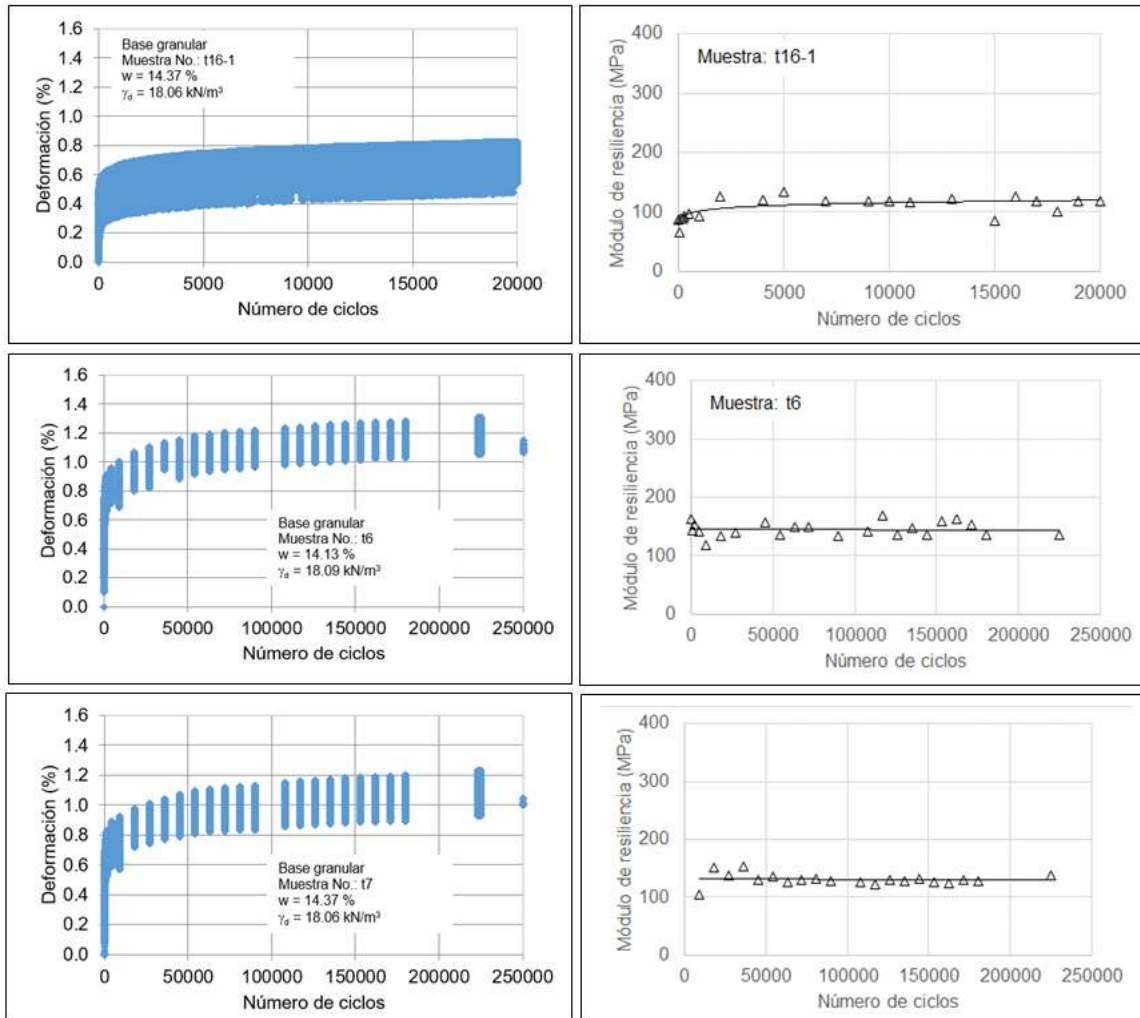


Figura 4.7. Pruebas de deformación a 20 000 y 250 000 ciclos en muestras de agregado tradicional y módulos de resiliencia.

4.7. Resultados de resistencia al esfuerzo cortante

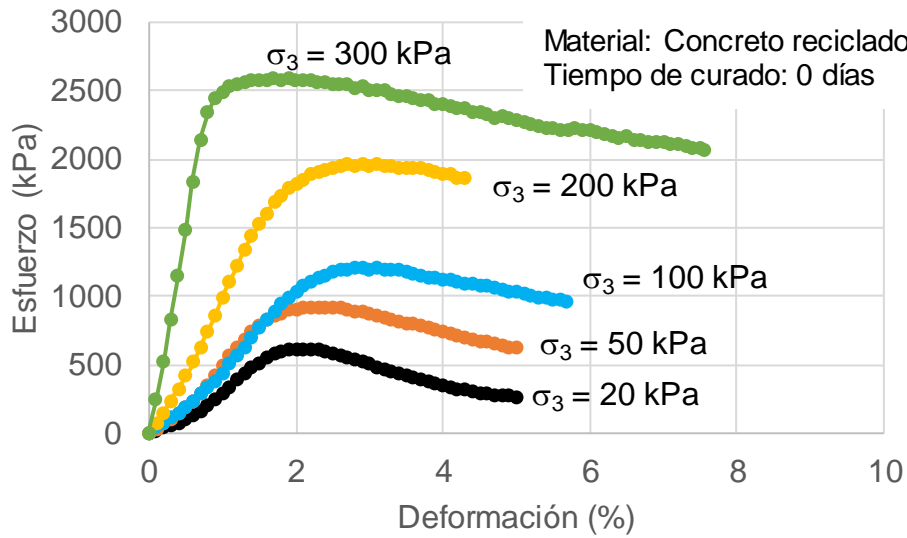
Otro de los parámetros de gran importancia de los materiales es la resistencia al corte. En esta investigación determinaron también la cohesión y el ángulo de fricción interna de los dos agregados ensayados. En la Tabla 4.8 se resumen las características de los especímenes ensayados en compresión.

Cabe hacer notar que las muestras de concreto reciclado fueron ensayadas a tres tiempos de curado, para determinar si se producía una mayor rigidización del material con el tiempo de curado. El agregado tradicional se ensayó para especímenes después de compactarlos y se asumió que este material no experimenta incremento en la resistencia, con el tiempo.

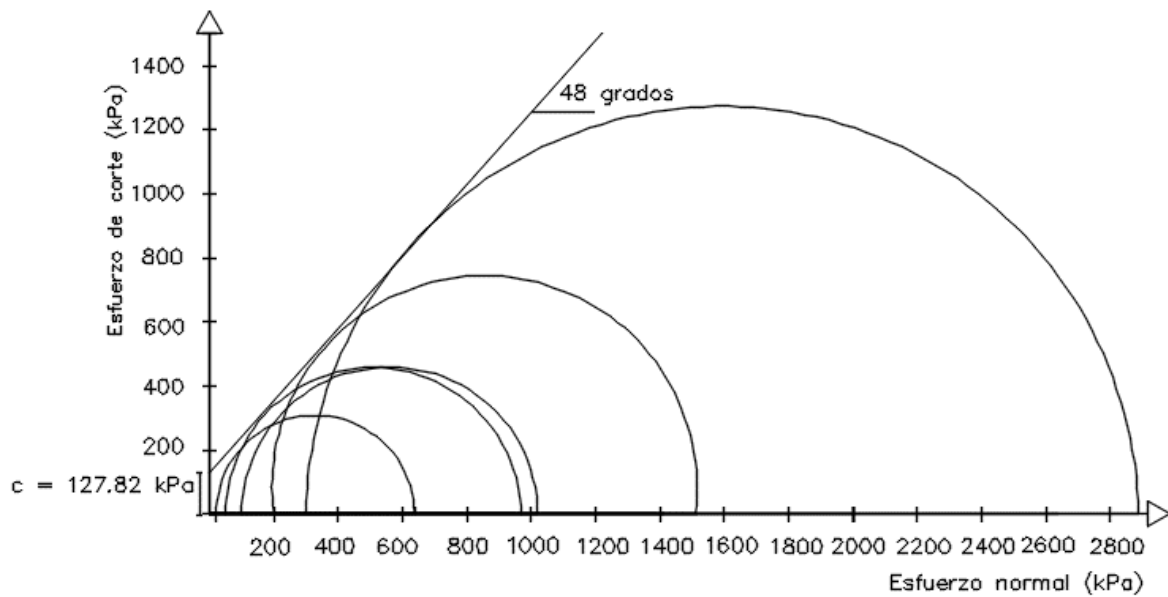
Las curvas esfuerzo-deformación en conjunto con los diagramas de Mohr aparecen en las Figuras 4.8 a 4.11.

Tabla 4.8. Características de los especímenes ensayados y presión confinante utilizada en la prueba de resistencia al esfuerzo cortante.

Especimen No.	d_{prom}, cm	h_{prom}, cm	Peso, g	w (%)	γ_d (kN/m³)	σ₃ (kPa)
Concreto reciclado, tiempo de curado: 0 días						
CM4	15.0	30.0	10200	10.14	17.14	20
CM1	15.0	30.0	10200	10.24	17.12	50
CM9	15.0	30.0	10200	10.00	17.16	100
CM2	15.0	30.0	10200	10.07	17.15	200
CM3	15.0	30.0	10200	9.97	17.16	300
Concreto reciclado, tiempo de curado: 7 días						
8-7	15.0	30.0	10200	10.28	17.11	0
CM5-7	15.0	30.0	10200	10.06	17.15	20
C24-7	15.0	30.0	10200	10.28	17.11	50
C-7-7	15.0	30.0	10200	10.19	17.16	100
CM7-7	15.0	30.0	10200	10.11	17.26	200
CM28-7	15.0	30.0	10200	10.14	17.14	300
Concreto reciclado, tiempo de curado: 28 días						
CM11	15.0	30.0	10200	10.47	17.06	50
CM12	15.0	30.0	10200	10.35	16.93	100
28D300	15.0	30.0	10200	10.74	16.89	300
Agregado tradicional, tiempo de curado: 0 días						
tc1	15.0	30.0	11160	14.18	18.09	50
tc2	15.0	30.0	11160	13.63	18.17	100
tc3	15.0	30.0	11160	14.10	18.10	150
tc4	15.0	30.0	11160	13.81	18.15	200
tc5	15.0	30.0	11160	14.49	18.64	300

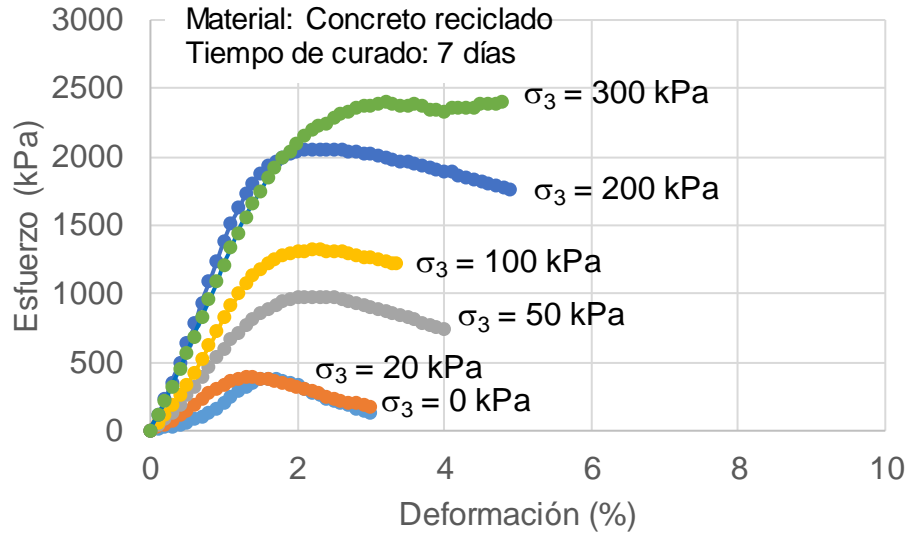


(a)

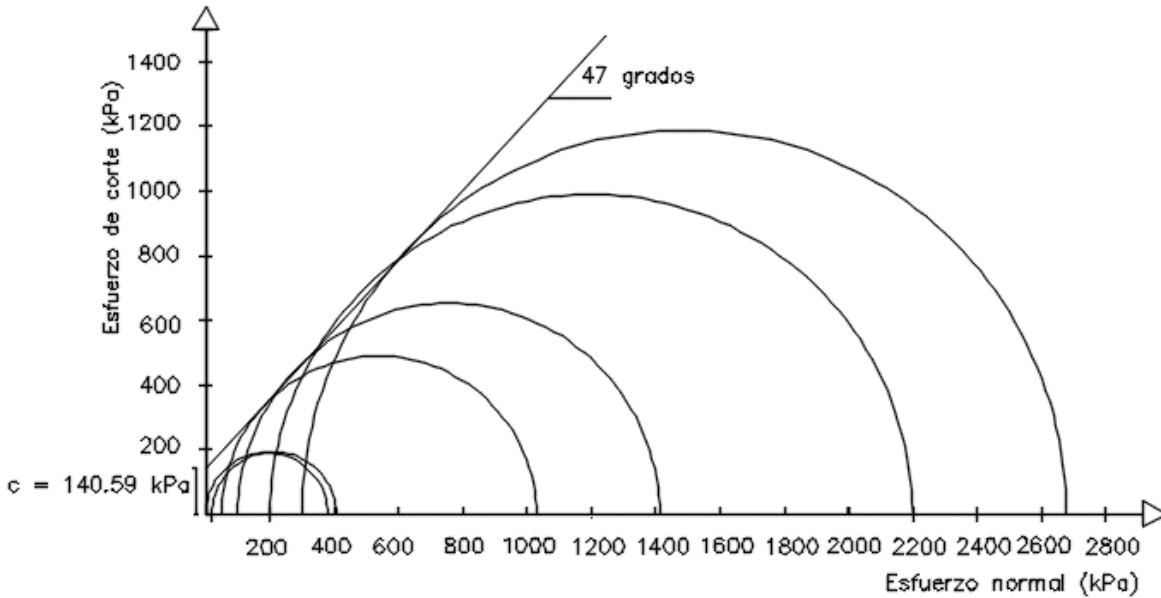


(b)

Figura 4.8. (a) Curvas esfuerzo-deformación de las muestras de concreto reciclado ensayadas después de la compactación; (b) Círculos de Mohr

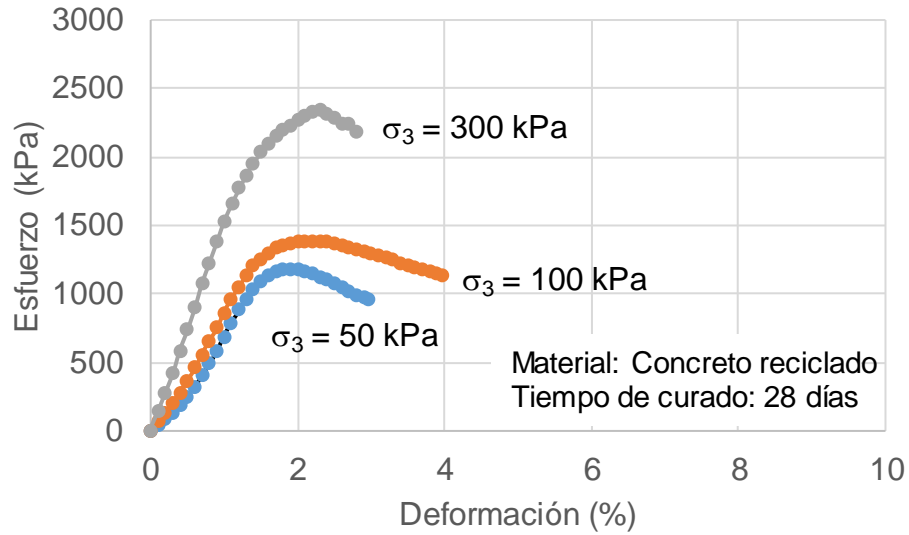


(a)

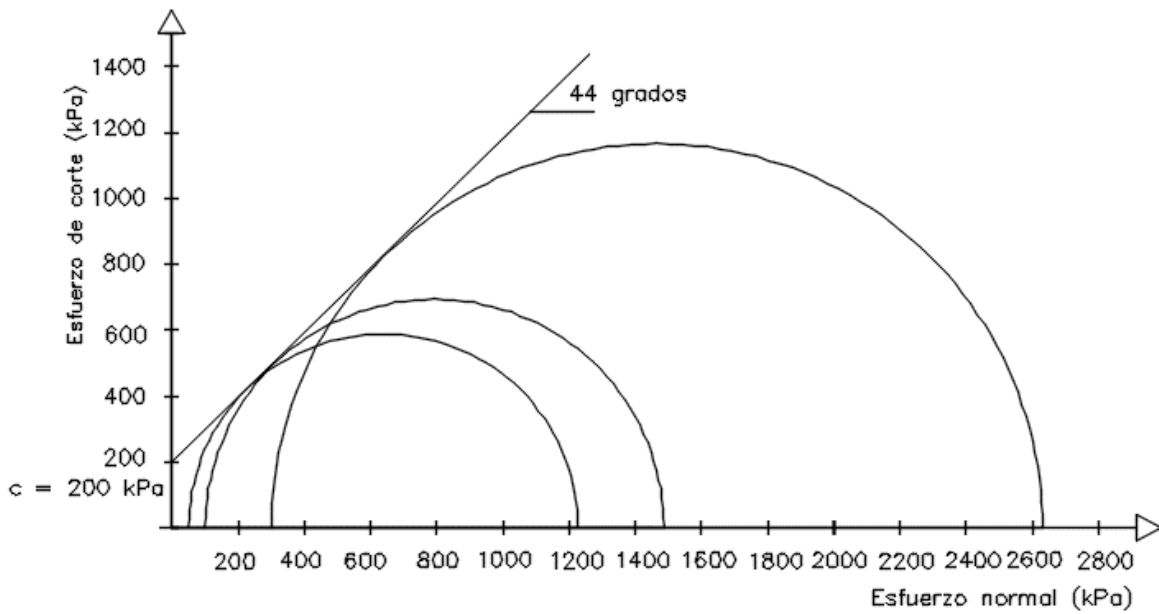


(b)

Figura 4.9. (a) Curvas esfuerzo-deformación de las muestras de concreto reciclado ensayadas después de 7 días de curado; (b) Círculos de Mohr

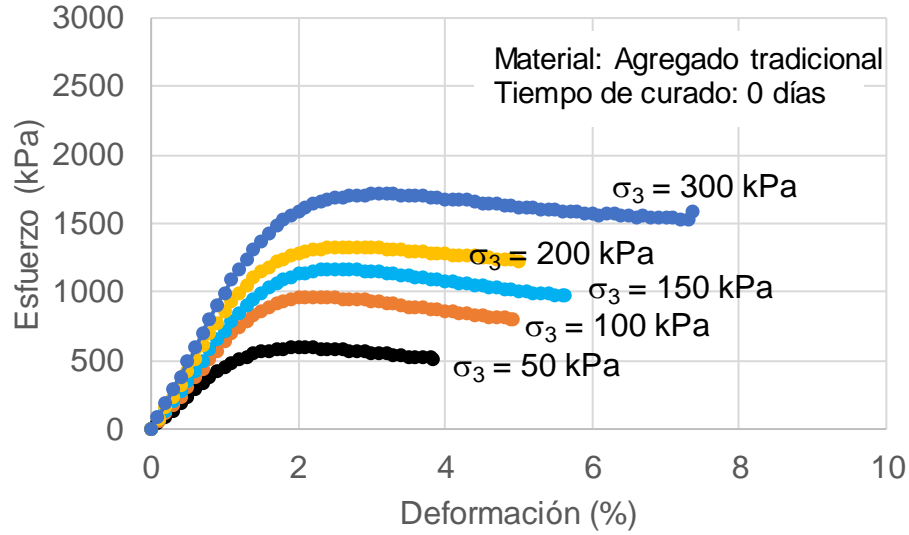


(a)

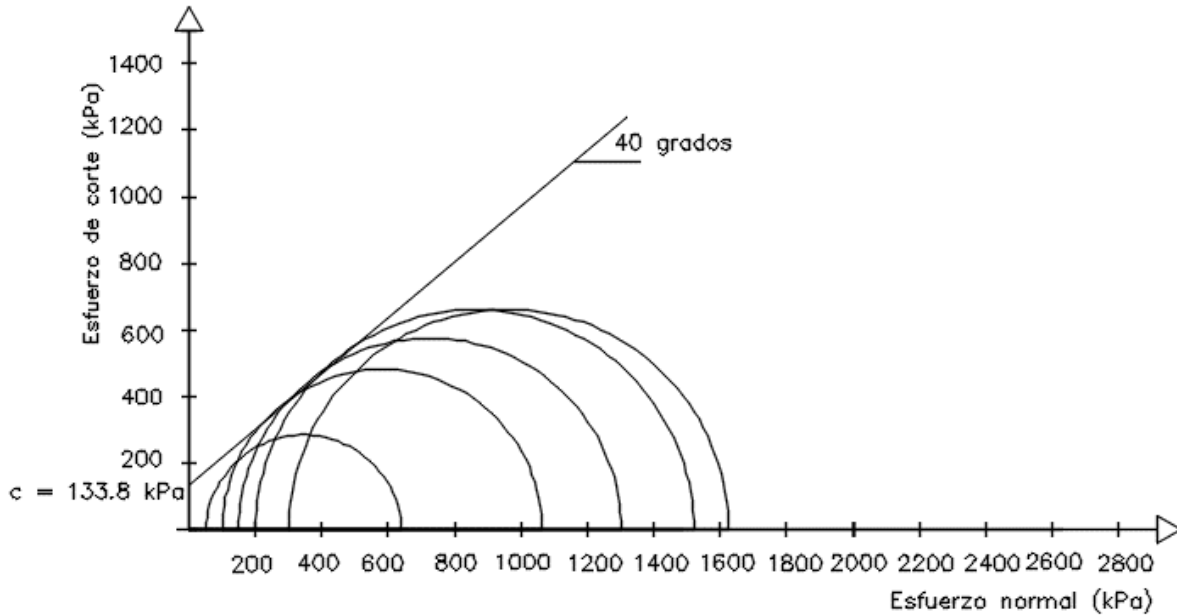


(b)

Figura 4.10. (a) Curvas esfuerzo-deformación de las muestras de concreto reciclado ensayadas después de 28 días de curado; (b) Círculos de Mohr



(a)



(b)

Figura 4.11. (a) Curvas esfuerzo-deformación de las muestras de agregado tradicional ensayadas después de compactarse; (b) Círculos de Mohr

En la literatura está documentado que algunas de las propiedades del agregado de concreto reciclado se mejoran con el tiempo de curado. En este caso, los valores de la cohesión se modifican ligeramente a mayor tiempo de curado; el ángulo de fricción interna se mantiene con valores similares. Por otro lado, el agregado tradicional presenta menor resistencia, lo que a su vez se refleja en un menor ángulo de fricción interna; la cohesión es similar al del agregado de concreto reciclado.

5 Conclusiones y recomendaciones

Los agregados de concreto reciclado son un material emergente que ha sido ampliamente estudiado en países extranjeros; sin embargo, en México se han realizado pocas investigaciones. Para contribuir al conocimiento del comportamiento de este tipo de agregado, se realizó la investigación presentada en este documento, de la cual se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los agregados de concreto reciclado han sido recomendados en la construcción de bases y subbases de pavimentos, ya que sus propiedades son similares a la de los agregados naturales; excepto que no pasan la prueba de desgaste de Los Ángeles, de acuerdo con la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes
- El agregado tradicional indica densidad más alta para la parte gruesa y menor para la fina. La absorción es mayor en el agregado de concreto reciclado.
- El agregado tradicional y el de concreto reciclado cumplen con la granulometría de base, de acuerdo con la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes
- El concreto reciclado indicó un contenido de agua óptimo y peso volumétrico seco máximo inferiores a los del agregado tradicional
- Los resultados de módulo de resiliencia indican valores mayores para el agregado de concreto reciclado. Asimismo, las muestras de agregado de concreto reciclado soportan niveles de esfuerzos más altos.
- Las pruebas de deformación permanente a 20 000 ciclos de carga, indicaron que el agregado de concreto reciclado acumula una deformación permanente de aproximadamente 0.58%, mientras que el agregado natural indicó 0.4%. Sin embargo, solo se realizó una prueba a 20 000 ciclos en agregado tradicional; por lo que el resultado deberá ser comprobado con un mayor número de pruebas
- Las pruebas de deformación a 250 000 ciclos indican que después de 20,000 ciclos de carga, la deformación permanente continúa acumulándose
- Los módulos de resiliencia determinados de las pruebas de deformación a 20 000 ciclos indican un valor de 200 MPa aproximadamente para el agregado de concreto reciclado, y 100 MPa para el agregado tradicional

- El módulo de resiliencia del agregado de concreto reciclado parece incrementarse con el número de ciclos, esto de acuerdo con las pruebas a 250 000 ciclos
- El agregado tradicional indica una deformación recuperable mayor, lo cual trae como consecuencia valores inferiores de módulo de resiliencia
- De las pruebas de resistencia al esfuerzo cortante se observó que el agregado de concreto reciclado presenta un ángulo de fricción interna mayor que el de agregado tradicional. La cohesión es similar en ambos agregados
- La cohesión se ve modificada ligeramente con el tiempo de curado en muestras de agregado de concreto reciclado
- El ángulo de fricción interna no presenta variaciones importantes con el tiempo de curado de los especímenes de agregado de concreto reciclado

Recomendaciones

- Sería recomendable estudiar el comportamiento de los materiales reciclados que provengan de un solo tipo de estructura; por ejemplo, demolición de pavimentos
- Es importante seguir estudiando el comportamiento de los agregados de concreto reciclado, para poder emitir una normativa de construcción y control de calidad
- El estudio de propiedades físicas y mecánicas deben complementarse con pruebas a los lixiviados, para evitar colocar materiales en las carreteras que sean perjudiciales al ambiente

Bibliografía y referencias

Acuña, C. A. y Montes, V. E. (2001). Tratamiento de los residuos de construcción y demolición. Disertación de la Universidad de Sonora. Febrero 2001.

A. E. Abu El-Maaty (2013). Utilization of cement treated recycled concrete aggregates as base or subbase layer in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*. 4, 661-673.

Anuario estadístico de la minería mexicana. Edición 2016.

Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M.M. & Bo. M. B. (2013). Geotechnical and Geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. Originally published in *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8), 1077-1088.

Aurstad, J., Aksnes, J., Dahlhag, J. E., Berntsen, G, y Uthus, N. (n.d.: 2004 or later). Unbound crushed concrete in high volume roads –a field and laboratory study. Consultado el 22 de diciembre de 2017 en:
https://www.vegvesen.no/_attachment/110433/binary/192516.

Aydelek, A. H. (2015). Environmental Suitability of recycled concrete aggregate in highways. Report. MD-15-SP109B4G-2. University of Maryland.

Batmunkh, N., Siripun, K., Jitsangiam, P., and Nikraz, H. (2010). Sustainable use of crushed concrete waste as a road base material. 4th International Conference on Sustainability Engineering and Science. Nov. 30, 2010. Auckland, New Zealand: The New Zealand Society for Sustainability Engineering and Science (NZSSES).

Blanca, G. V., Castilla, C. N., Cortés, L. J. M., Martínez, A. A., y Pastor, V. R.M. (s.f.). Gestión de residuos de la construcción y demolición en una obra de nueva planta. Construcciones Arquitectónicas. ETS Arquitectura.

Blankenagel, B. J. (2005). Characterization of recycled concrete for use as pavement base material. Brigham Young University-Provo. All theses and dissertations. Paper 640.

Bennert, T. y Maher, A. (2008). The use of recycled concrete aggregate in a dense graded aggregate base course. Final Report. FHWA-NJ-2008-002. New Jersey Department of Transportation.

Cooley, L. y Hornby, H. (2012). Evaluation of crushed concrete base strength. Mississippi Department of Transportation. Project No.

Cooley, L. A., Brumfield, J., Easterling, J., y Hkandal, P. S. (2007). Evaluation of Recycled Portland Cement Concrete Pavements for Base Course and Gravel Cushion Material. Study SD05-07. Final Report.

Diagnóstico básico de residuos de construcción del Estado de México. Programa de Cooperación Técnica México-Alemania "Gestión Ambiental y Manejo Sustentable de Recursos Naturales. Componente Residuos Sólidos y Sitios Contaminados (PN2003.2462.4-003.00). Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno del Estado de México.

Ellis, R., Agdas, D., y Frost, K. (2014). Developing improved opportunities for recycling and reuse of materials in road, bridge, and construction projects. Department of Civil and Coastal Engineering. University of Florida. Consulted at: http://www.fdot.gov/research/Completed_Proj/Summary_SMO/FDOT-BDV31-977-09-rpt.pdf (7 de septiembre de 2017).

Ficha técnica (2010). Residuos de construcción y demolición. Clave 4.1. Diciembre.

Gallage, C., Jayakody, S., y Ramanujam, J. (2014). Effects of moisture content on resilient properties of recycled concrete aggregates (RCAs). Fourth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment. Brisbane, Australia. No. 19-21, 2014.

Glinka, M.E., Vedoya, D.E. y Pilar, C.A. (2006). Estrategias de reciclaje y reutilización de residuos sólidos de construcción y demolición. Jornadas de Investigación 2006. Universidad Nacional del Nordeste.

Gómez, A., y Farías, M. (2012). Comportamiento físico-mecánico de un residuo de construcción y demolición en la estructura de pavimento. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. 14-16 de noviembre. Cancún, Quintana Roo. México.

Jayakody, S., Gallage, Ch., y Kumar, A. (2014). Assessment of recycled concrete aggregates as a pavement material. *Geomechanics and engineering*, 6(3). Pp. 235-248.

Jayakody, S., Gallage, C., & Kumar, A. (2012). Assessment of recycled concrete aggregate for road base and subbase. In Hossain, Md. Zakaria & Huat, Bujang B.K. (Eds). *Proceedings of the Second International Conference on Geotechnique, Construction and Materials and environment*. The GEOMATE International Society, Kuala Lumpur, Malaysia. Pp. 575-579.

Kuo, S.S., Mahgoub, S., y Nazef, A. (2002). Investigation of recycled concrete made with limestone aggregate for a base course in flexible pavement. Transportation Research Record 1787. Paper No. 02-3098.

Leandro, H. A. G. (2007). Administración y manejo de los desechos en proyectos de construcción. Etapa 2: Alternativas de manejo. Escuela de Ingeniería en Construcción. Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción CIVCO. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Mallic, R. B., Radzicki, M. J., Zaumanis, M., y Frank, R. (2014). Use of system dynamics for proper conservation and recycling of aggregates for sustainable road construction. Resources, Conservation and Recycling 86 (2014). Pp. 61-73.

Monografía sobre residuos de construcción y demolición. Edita IHOBE, Sociedad Pública de Gestión Ambiental.

Moore, T., Jagdat, S., Kazmierowski, T., y Ng, L. (2014). Quality Metrics for Recycled Concrete Aggregates in Municipal Roads. 2014 Conference of the Transportation Association of Canada (TAC), Montréal, Québec, Canada, 11 p. paper on conference proceedings. Recuperado de <http://conf.tac-atc.ca/english/annualconference/tac2014/s-22/jagdat.pdf>.

Neves, J., Freire, A.C., Roque, A.J., Martins, I. M., antunes, M.L., y Faria, G. (s.f). Utilization of recycled materials in unbound granular layers validated by experimental test sections. Consultado 22 de diciembre de 2017 en: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428712651/>

Newman, P., Hargroves, Ch., Desha, Ch., Kumar, A., Whistler, L., Farr, A., Beauson, J., Matan, A., y Surawski, L. (2011). How will the future of roads be navigated? Sustainable built environment National Research Centre (SBEnc) literature review by Curtin University and the Queensland University of Technology.

Schaertl G.J., y Edil, T.B. (2009). Literature Search and Report on Recycled Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate. University of Wisconsin-Madison. March 18, 2009.

Secretaría de Economía (2013). Estudio de la cadena productiva de los materiales pétreos. Documento de análisis.

Shull, M., Allen, D.L., Fleckenstein, L. J., Graves, C., Hunsucker, D. (1998). Performance Evaluation of Recycled PCC Pavement Used as a Crushed Stone Base and Dense Grade Aggregate. Research Report KTC-97-3. Kentucky Transportation Center. April 1998.

User Guidelines for Byproducts and Secondary Use Materials in Pavement Construction. FHWA Report FHWA-RD-97-148. Federal Highway Administration, McLean. Virginia (2008).

Use of recycled aggregates in Construction. Revista: Cement Concrete & Aggregates Australia. May 2008.

Van Dam, T., Smith, K., Truschke, C., y Vitton, S. (2011). Using recycled concrete in MDOT's Transportation Infrastructure. Manual Practice. Final Report. Report number: RC-1544. Michigan Tech University.

NORMATIVA ASTM

ASTM D 698. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12400 ft – lbf / ft³ (600 kN/m³)).

ASTM D 854. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soils Solids by Water Pycnometer.

ASTM D 1130. Standard Test Methods for Amount of Material in Soils Finer than No. 200 (75 – μ m) Sieve.

ASTM D 2166. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength Soil.

ASTM D 2216. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.

ASTM D 4318. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

PÁGINAS WEB

<http://www.jornada.unam.mx/2016/05/20/estados/028n1est>



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"
Parque Tecnológico San Fandila
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México
CP 76703
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad
certificada bajo la norma ISO 9001:2015