



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – CONSTRUCCIÓN

**“USO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA LA FABRICACIÓN DE
ADOQUINES QUE SE PUEDAN UTILIZAR EN LA PAVIMENTACIÓN DE
CALLES, AVENIDAS Y PASOS PEATONALES”**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. JOSE LUIS MONTIEL MIGUEL

TUTOR PRINCIPAL:
ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – CONSTRUCCIÓN

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., JUNIO 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A mis padres por el apoyo incondicional que me han brindado durante todo este tiempo de preparación y desarrollo profesional, pues han sido mi gran motivo de superación y lucha en la vida.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme formar parte de ella, pues ha sido como mi segundo hogar y gracias a ello he podido formarme plenamente como una mejor persona.

A los profesores que imparten las asignaturas de la Maestría en Construcción por brindarme sus experiencias y conocimientos, gracias a ellos he podido ampliar mis horizontes en el ámbito personal y profesional.

A mi tutor de tesis Ing. Juan Luis Cottier Caviedes por su apoyo incondicional en el desarrollo de la presente investigación.

Al M. en I. Marco Tulio Mendoza Rosas por el apoyo y orientación que me ha brindado durante mi estancia en el posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico que me ha brindado, ya que sin ello no hubiese sido posible llevar a cabo la presente investigación.



INDICE

Introducción	1
Justificación	2
Objetivos	2
Hipótesis	3
CAPÍTULO I. Generalidades	4
1.1.- Historia de los adoquines	5
1.1.1.- Los adoquines en la actualidad	7
1.2.- Historia del reciclaje de los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD)	8
CAPÍTULO II. Disposición de los residuos de la construcción, Legislación y Normatividad	10
2.1.- Disposición de los residuos de la construcción	11
2.2.- Contexto mundial sobre el manejo de los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD)	15
2.2.1.- En Europa	15
2.2.2.- En América	16
2.3.- Legislación y Normatividad sobre la disposición de los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD)	17
2.3.1.- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente	17
2.3.2.- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos	18
2.3.3.- Reglamento de Construcción para el Distrito Federal	18
2.3.4.- Norma Ambiental del Distrito Federal NADF-007-RNAT-2013	18
2.3.5.- NOM-161-SEMARNAT-2011	19
2.4.- Conclusión capitular	20
CAPÍTULO III. Caracterización de los agregados reciclados	21
3.1.- Muestreo de los agregados reciclados	22
3.2.- Preparación de los agregados	23
3.3.- Análisis granulométrico	23
3.4.- Contenido de materia orgánica	26
3.5.- Contenido de pasta de cemento adherido al agregado grueso	27
3.6.- Masa volumétrica	28
3.7.- Masa específica (densidad) y absorción	29
3.8.- Conclusión capitular	33
CAPÍTULO IV. Diseño de mezclas	35
4.1.- Diseño de mezclas de concreto por el método de ACI	36
4.2.- Ejemplo de diseño	39
CAPÍTULO V. Fabricación de adoquines de concreto, utilizando agregados reciclados como materia prima	41
5.1.- Diseño y construcción de adoquineras manuales	42
5.2.- Fabricación de los adoquines	44
5.2.1.- Adoquines CAR-1	44
5.2.2.- Adoquines CAR-2	45
5.2.3.- Adoquines CAR-3	45
5.2.4.- Adoquines CAR-4	46
5.3.- Adoquines con caucho	47



5.3.1.- Adoquines CARyC-1	47
5.3.2.- Adoquines CARyC-2	48
5.3.3.- Adoquines CARyC-3	49
5.3.4.- Adoquines CARyC-4	50
5.4.- Conclusión capitular	52
CAPÍTULO VI. Características técnicas de los adoquines	53
6.1.- Resistencia a la compresión	54
6.1.1.- Adoquines fabricados con agregados reciclados	54
6.1.2.- Adoquines fabricados con agregados reciclados y caucho	57
6.2.- Resistencia a la abrasión	59
6.2.1.- Preparación de las probetas	62
6.2.2.- Desgaste de las probetas	63
6.2.3.- Resultados	65
6.3.- Resistencia a la flexión	66
6.4.- Absorción total en 24h	68
6.5.- Absorción máxima inicial	70
6.6.- Resistencia al impacto	72
6.7.- Conclusión capitular	77
CAPÍTULO VII.- Costo de producción de los adoquines	78
7.1.- Calculo del precio por adoquín	79
7.2.- Precio por unidad de adoquín CAR-1 (480 Kg/cm ²)	80
7.3.- Precio por unidad de adoquín CAR-2 (420 Kg/cm ²)	80
7.4.- Precio por unidad de adoquín CAR-3 (360 Kg/cm ²)	81
7.5.- Precio por unidad de adoquín CAR-4 (250 Kg/cm ²)	81
7.6.- Precio por unidad de adoquín CARyC-3 (350 Kg/cm ²)	82
7.7.- Precio por unidad de adoquín CARyC-3 (250 Kg/cm ²)	82
CAPÍTULO VIII. Conclusiones	83
Anexos	86
BIBLIOGRAFIA	91



INTRODUCCIÓN

En cualquier tipo de civilización siempre ha existido la necesidad de contar con vías de comunicación de buena calidad, pues de ello dependen muchos aspectos, uno de ellos y el más importante es el crecimiento económico. Cualquier nación, que no cuente con vías de comunicación suficientes o en excelentes condiciones, se verá limitada en cuanto a su crecimiento, pues se debe tener en cuenta que las vías de comunicación son el principal activo de una sociedad.

Actualmente y pese a los avances científicos y tecnológicos, no se cuenta con excelentes superficies de rodamiento, esto es más notable en los países subdesarrollados en donde la cultura de calidad no ha tenido un gran auge o donde la inversión en infraestructura no ha sido suficiente. La ciudad de México en particular padece de un enorme problema al no poder cubrir la necesidad de contar con calles y avenidas en excelentes condiciones ocasionando con ello grandes pérdidas a la población, tales como son accidentes, descomposturas, tránsito lento, encharcamientos, etc.; diversos son los factores que contribuyen a la proliferación de dicho problema, tales factores pueden encontrarse relacionados al costo y calidad de los trabajos de construcción, otros factores relacionados son la corrupción y la cultura de la sociedad, surgiendo así la necesidad de resolver el problema de forma práctica y factible sin comprometer el concepto de calidad.

México se encuentra bajo un gran rezago en cuanto a la integración de nuevos métodos y técnicas de construcción, no se ha podido consolidar los conocimientos existentes en cuanto a los materiales de construcción y su correcta aplicación, como ejemplo tenemos las deficientes superficies de rodamiento existentes en nuestra ciudad y sus alrededores.

Es bien sabido que dentro de los factores que influyen en la conservación de superficies de rodamiento en calles y avenidas, son las partidas presupuestales que tienen las delegaciones y los municipios, las cuales en la mayoría de los casos no son debidamente administrados, y por lo tanto los recursos económicos no alcanzan a cubrir trabajos de reparación y mantenimiento de los pavimentos.

Por lo anteriormente citado, se hace énfasis al uso de adoquines como alternativa de pavimentación, por sus características técnicas y económicas que lo convierten en un método factible de construcción, solucionando en parte la problemática de los costos y tiempos de reparación. Aunado a lo anterior, hacer uso de concreto reciclado para fabricar adoquín, lo convierte en un material más atractivo para dar solución a los problemas mencionados con las superficies de rodamiento.

Los avances científicos y tecnológicos traen consigo la creación de nuevos materiales que en un tiempo determinado se convierten en contaminantes, dicho en otras palabras, la evolución de los residuos generados por la humanidad ha venido de la mano con sus avances tecnológicos; es por esta razón que surge una nueva necesidad que consiste en resolver la correcta disposición de residuos y su reciclaje. En nuestro país el tema de residuos de la construcción solo se limita a la disposición de estos en vertederos autorizados o en su mayoría clandestinos, aun no existe plena conciencia de las consecuencias que esto puede traer en nuestra sociedad.



El presente trabajo de investigación pretende, encontrar una solución práctica y factible a las deficiencias encontradas comúnmente en calles, avenidas y pasos peatonales, mediante el uso de agregados producidos a partir de los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD), para la fabricación de adoquines. En primera instancia se mencionan algunas generalidades en cuanto al sistema de pavimentación con adoquines, para posteriormente entrar en tema de normatividad y legislación con respecto a la disposición de residuos generados por la industria de la construcción.

Posteriormente, en la parte práctica, se obtienen las características físicas de los agregados reciclados producidos en planta, para después elaborar diseños de las mezclas y así con ello poder fabricar los adoquines. Por último se describirán las pruebas físicas realizadas a los distintos tipos de adoquines fabricados así como los resultados obtenidos para finalmente emitir conclusiones y recomendaciones sobre la factibilidad del uso de agregados reciclados en la fabricación de adoquines.

JUSTIFICACIÓN

El desarrollo del presente trabajo, surge de la necesidad de poder solucionar dos problemas que comúnmente encontramos en nuestra sociedad, dichos problemas se encuentran relacionados con el tránsito vehicular y peatonal, pero también con la contaminación ocasionada por los residuos originados en la industria de la construcción.

Por un lado se tiene la falta de mantenimiento y/o de rehabilitación de los pavimentos, ya sean de concreto asfáltico o de concreto hidráulico; y por otro, la proliferación de tiraderos clandestinos y la mala disposición de los RCD.

En atención a lo anteriormente mencionado, se crea una propuesta en la que se pueda incorporar en una cadena de producción, a los agregados producidos a partir de la disposición y tratamiento de los RCD, con la finalidad de crear nuevos productos que sean útiles y prácticos, en este caso los adoquines.

OBJETIVOS

General:

Realizar un estudio teórico y experimental en el que se muestre si es o no factible el uso de agregados reciclados producidos en planta para la fabricación de adoquines.

Particulares:

- Determinar la eficacia, mediante ensayos, que poseen los adoquines hechos con agregados reciclados para ser usados en la pavimentación.
- Generar una propuesta práctica en la que se busque incorporar, en una cadena de producción, a los agregados producidos a partir del tratamiento de RCD.



HIPÓTESIS

Investigaciones realizadas en nuestro país muestran la factibilidad sobre el uso de agregados reciclados, no obstante cabe mencionar que dentro de dichas investigaciones, se utilizan agregados producidos por los propios autores, tomando como materia prima concretos que han sido controlados en cuanto a diseño, resistencia y principalmente su curado, siendo así que no fueron sometidos a diversos factores que se encuentran comúnmente en una obra como lo es el intemperismo, colocación deficiente, falta de curado, etc., tal materia prima consiste en los cilindros de concreto que se desechan después de haber sido sometidos al ensaye de resistencia a compresión en los laboratorios de construcción.

En la presente investigación, se hará uso de agregados producidos en planta, la cual es propiedad de la empresa CONCRETOS RECICLADOS S.A. DE C.V, y en la que se recibe una gran variedad de bloques de concreto que posteriormente se trituran para producir agregados de diversos tamaños, es importante señalar que durante la producción, concurren varios tipos de material pétreo, mampostería y uno que otro contaminante.

Al no contar con antecedente alguno, sobre el uso de agregados producidos en planta, para la fabricación de concreto, se presupone que el uso de estos es factible siempre y cuando se cuiden ciertos aspectos como lo es la limpieza, uniformidad del tamaño, control de material fino, etc.; solo así el concreto producido se podrá utilizar en elementos no estructurales y en donde su resistencia no necesariamente se encuentre comprometida con la funcionalidad. Un ejemplo de aplicación son los elementos de mampostería, como lo son los adoquines en este caso.



“USO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES QUE SE PUEDAN UTILIZAR EN LA PAVIMENTACIÓN DE CALLES, AVENIDAS Y PASOS PEATONALES”



CAPÍTULO I.- GENERALIDADES



1.1.- HISTORIA DE LOS ADOQUINES.

Los adoquines tienen sus orígenes hace más de 20 siglos en el empedrado. Su aparición se debió a la necesidad sentida por el hombre de tener vías durables, limpias y seguras, que le permitieran un desplazamiento rápido en cualquier época del año.

El Imperio Romano, hizo de las primeras vías de comunicación una cuestión esencial para la propia administración y control de los diversos pueblos. El poderío militar y el comercio fueron los dos principales pilares de Roma, difícilmente habrían podido resistir durante siglos si la movilidad que les proporcionaban las vías de comunicación no hubiera multiplicado la eficacia de unos medios limitados de transporte. Ellos hicieron posible la omnipresencia de los ejércitos romanos.

Las vías de comunicación dentro del Imperio Romano tejieron una amplia red por gran parte del territorio, uniendo entre sí y con la capital, Roma, las principales ciudades y puestos militares estratégicos. Siguieron en principio las primeras rutas que abrieron las tropas en sus conquistas de nuevos territorios y las vías seguidas por el comercio.

En su inicio fueron simples caminos, que libres de vegetación y de grandes obstáculos facilitaban enormemente el avance de los carros o la marcha rápida de ejércitos pero pronto comenzaron a realizarse mejoras, en especial en aquellos que unían los puntos más importantes. Algunos caminos se reforzaron con losas de piedra que permitieron transitar por lugares en donde la lluvia y el lodo impedían el tránsito (fig.1.1). Otros se convirtieron, por así decirlo, en prolongaciones de las avenidas de entrada y de salida de Roma, que a lo largo de cientos de kilómetros constituyó las vías principales.

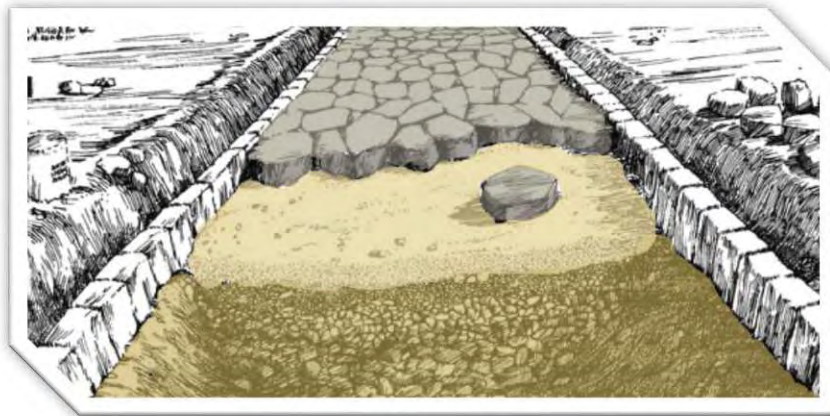


Fig. 1.1- Calzada Romana (Recreación). [29]

La Vía Apia (fig.1.2) fue una de las más importantes calzadas de la antigua Roma, que unía Roma con Brindisi, el más importante puerto comercial con el Mediterráneo Oriental y Oriente Medio. Su longitud es de 540 km de longitud y aproximadamente 8m de anchura estaba calculada para el paso simultáneo de dos carros viajando en sentido contrario. La calzada estaba realizada a base de piedra basáltica de forma poligonal y estaba flanqueada a ambos lados por una acera de aproximadamente un metro de ancho.



Fig. 1.2.- Vista de la Vía Apia en la actualidad. [30]

Así, a la vez que se perfeccionaban los carros de tracción animal, también se buscó una superficie de rodamiento continua que permitiera un tránsito más cómodo; para lograr esto se abandonó la práctica de colocar las piedras en estado natural y se les comenzó a tallar en forma de bloques para obtener un mejor ajuste entre los elementos. Esta simple acción dio lugar al surgimiento del primer pavimento de adoquines, pues la palabra española adoquín proviene del árabe «ad-dukân», que quiere decir «piedra escuadrada o a escuadra».

La construcción de los pavimentos de piedra continuó hasta comienzos del siglo XX, actualmente son pocos los pavimentos que se encuentran en servicio y en buen estado, lo cual atestigua su durabilidad.

Con la urbanización en el siglo XIX y la aparición del automóvil de combustión interna a finales del mismo siglo, no resultaba económico ni práctico tallar una gran cantidad de piedras que requería el ritmo de pavimentación. Por esto, los adoquines de piedra comenzaron a sustituirse con los de arcilla recocida y por bloques de madera, gracias a lo cual se desarrollaron las técnicas de pavimentación con concreto y con asfalto, muy comunes en la actualidad.

La pavimentación con bloques de madera se desechó muy pronto, pero en algunos países europeos se trabajaron grandes extensiones de pavimentos de adoquines de arcilla recocida, con resultados aceptables a pesar del desgaste acelerado de las piezas. Al comenzar la reconstrucción de Europa, tras la Segunda Guerra Mundial, la arcilla recocida se utilizó solo en la construcción de vivienda, por lo que se comenzaron a fabricar, en moldes individuales adoquines de concreto.

Los adoquines de concreto pronto mostraron grandes ventajas sobre los de arcilla, en especial, por su durabilidad. Más tarde, Alemania impulsaría el desarrollo de las máquinas vibro-compresoras para elaborar en serie piezas de concreto, con lo cual se industrializó la producción de los adoquines, popularizándolos por todo el mundo.



Fue en Holanda y Alemania donde mayoritariamente se usaron durante la primera mitad del siglo XX, y donde primeramente se empezó a investigar sobre diferentes formas y modelos de colocación.

Al principio, los adoquines de concreto simplemente imitaban a los de piedra, con las consiguientes limitaciones estéticas, resultando más fácil tanto su fabricación como su colocación. Más tarde, conforme los procesos de fabricación fueron mejorando, se empezaron a introducir formas dentadas o curvas, donde las tolerancias dimensionales eran ya muy pequeñas. Esto permitió que las cuadrillas de colocación no fuesen tan especializadas como antiguamente, y que los adoquines se adaptasen mejor a cualquier alineación. La evolución técnica se disparó en la década de los 70, provocando la aparición de numerosos sistemas de fabricación, modelos de adoquines y principalmente, el abaratamiento de los costes de fabricación y colocación.

1.1.1.- LOS ADOQUINES EN LA ACTUALIDAD.

Actualmente los adoquines se fabrican por medio de un mecanismo vibro-compresor y en grandes lotes (fig. 1.3), además, cuentan con una amplia diversidad de usos que tienen para pavimentar incluyendo desde una simple entrada de vehículos, calles, caminos secundarios, paseos peatonales y plazas, hasta pisos de puertos en donde el tránsito peatonal es demandante. Por ello conviene resaltar las bondades de este sistema a los arquitectos, proyectistas y diseñadores en cuanto a las ventajas de tipo estructural y estético, que permiten ampliar sus posibilidades de uso.



Fig. 1.3.- Fabricación mecanizada de grandes lotes de adoquines. [31]

En México los adoquines se usan desde hace más de cinco décadas y forman parte de una industria que atiende entre otros sectores al mercado inmobiliario (casa habitación y vivienda colectiva); espacios públicos (andadores, plazas, zonas recreativa, parques o estacionamientos); transporte (puertos y aeropuertos), entre otros.

Cabe mencionar que en la ciudad de México y el Área Metropolitana los adoquines no suelen ser muy utilizados en la pavimentación de calles o avenidas, se nota un uso más común en algunos estados de la república como lo es Guanajuato, Oaxaca, San Luis Potosí, etc. en donde la estética del pavimento se conjuga con los paisajes propios de cada Estado, como lo son el centro histórico, los palacios municipales e iglesias (fig. 1.4 y 1.5).



Fig. 1.4.- Centro histórico San Luis Potosí. [32]



Fig. 1.5.- Calle pavimentada con adoquines en el estado de Guanajuato. [32]

En algunos países europeos así como en Brasil, se han tomado muy en serio el tema de la pavimentación con adoquines, tal es la importancia que le dan a este sistema que han optado por utilizar pavimentadoras de adoquines, reduciendo con ello los tiempos de ejecución de los trabajos e incrementando el área a pavimentar (fig. 1.5).

En nuestro país el adoquín no ha tomado tanta relevancia como lo son otros sistemas de pavimentación, la colocación de los adoquines aún se hace en forma manual, lo que lo convierte en un sistema con tiempos de ejecución más prolongados en comparación con otros, además de que la calidad de las piezas en muchas ocasiones es deficiente o por el contrario, el adoquín puede ser de excelente calidad pero el proceso constructivo o mano de obra es muy deficiente.



Fig. 1.5.- Colocación de adoquines con pavimentadora. [33]

1.2.- Historia del Reciclaje de los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD)

El empleo del concreto reciclado data de los tiempos posteriores a la segunda guerra mundial, donde los europeos enfrentaban la problemática de la gran acumulación de escombros en sus ciudades destruidas, motivo por el cual se abocaron a reciclar dichos



desperdicios y utilizarlos como material de construcción, obteniendo muy buenos resultados.

En esa época los desechos se utilizaron en la elaboración de concreto para la reconstrucción, particularmente en Gran Bretaña y Alemania, de sus ciudades destruidas por la guerra (fig. 1.6). Más adelante, cuando las fortificaciones fueron demolidas el material de desecho obtenido fue en gran parte aprovechado en la construcción.



Fig. 1.6.- Los escombros originados a causa de la segunda guerra mundial, tuvieron que ser reutilizados por las naciones Europeas afectadas, para llevar a cabo la reconstrucción de sus ciudades. [34]

Las publicaciones de esos años, reportaron las propiedades del concreto reciclado, principalmente en textos ingleses, alemanes y rusos. Las experiencias de Europa motivaron a realizar algunas investigaciones sobre reciclaje del concreto en Estados Unidos, en esa misma época.

La mayor parte de los textos describen la utilización del producto obtenido de la demolición de tabiques, ya que estos eran el material de construcción predominante. Sin embargo existen, cuando menos, dos reportes que datan de la posguerra inmediata, en los que se describe el uso de los desechos de concreto.

En el norte de Múnich los escombros fueron empleados para rellenar desniveles de terrenos, que más tarde servirían como base para la construcción del estadio olímpico y sus instalaciones para los juegos olímpicos de 1972. Otra parte de los escombros fue llevada a plantas de reciclaje, las cuales fueron creadas para la ocasión, con la idea de aprovechar todo lo aprovechable e introducirlo de nuevo en la cadena de construcción. Los programas más importantes de reciclaje se dieron en las ciudades de Sttutgard, Frankfurt, Hamburgo y Bremen. Para el año de 1952 en Sttutgard, se había conseguido retirar más del 88% de estos escombros, con los cuales se lograron construir más de 10,000 viviendas.

A partir de este acontecimiento la humanidad se dio cuenta de que la acción de reciclar o reutilizar RCD era una realidad, la cual contribuiría en gran medida a la satisfacción de necesidades o requerimientos demandados por la misma. Desde entonces esta práctica se lleva a cabo en los países del viejo continente, siendo estos los pioneros en la industria del reciclaje. En la actualidad los conceptos de ecología y medio ambiente están adquiriendo mayor importancia a nivel Mundial, esto afecta directamente a la industria de la construcción por que el tipo de actividades que involucran a la industria pueden tener consecuencias perjudiciales e incluso irreversibles sobre el medio ambiente, a parte que cada día son más escasos los recursos naturales primarios a extraer.



CAPÍTULO II.- DISPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN, LEGISLACIÓN Y NORMATIVIDAD

2.1.- Disposición de los residuos de la construcción.

Actualmente el crecimiento demográfico y la demanda de infraestructura para cubrir las necesidades de la población han ocasionado un incremento de actividades en la industria de la construcción, demolición y remodelación de vivienda e infraestructura; consecuentemente se ha dado un incremento en los residuos generados por dichas actividades asociadas a la construcción, tales residuos están constituidos generalmente por fragmentos de mampostería, piedras, tierra, desperdicio de concreto o concreto demolido, mortero, madera, alambre, plástico, yeso, cal, cerámica, en resumen la composición de los residuos de la construcción son ampliamente variados.

Por su volumen y peso, los residuos de la construcción, afectan a los vehículos encargados del servicio público de recolección de basura además de poner en riesgo la vida útil de los sitios de disposición final de la basura que se genera en las ciudades; por esta razón los residuos de la construcción no son recolectados como se haría comúnmente con la basura doméstica, en consecuencia es frecuente observar en camellones, barrancas, lotes baldíos y ríos, costales o montículos de este tipo de residuos (fig. 2.1).



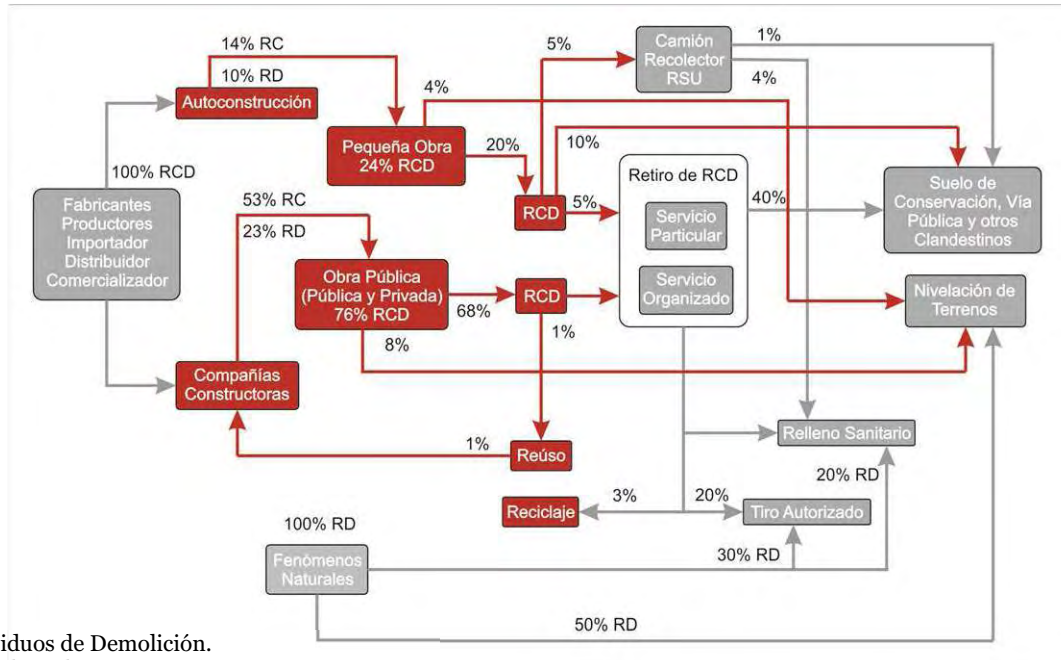
Fig. 2.1.- Tiraderos clandestinos que se crean con la falta de conciencia sobre la disposición de los residuos de la construcción. Fuente: propia.

El manejo que actualmente se presenta en los residuos de la construcción se muestra en la figura 2.2, en donde se identifican como fuentes de generación a las obras de autoconstrucción, las obras públicas y privadas y los residuos generados a partir de situaciones de desastre.

Si bien la mayor parte de los residuos generados en obras pequeñas son retirados por vehículos de carga privados, poco más del 5%, son trasladados por vehículos recolectores de residuos de sólidos urbanos (RSU), y se estima que cerca del 10% de los residuos se disponen en suelo de conservación o en la vía pública.

Para el caso de las obras público y privadas se estima que el 67% de sus residuos son transportados por vehículos de carga privados, sin embargo, tan sólo el 20% se dispone en sitios autorizados y un 3% se recicla, disponiendo el resto para nivelación de terrenos, rellenos sanitarios y de manera inapropiada en suelos de conservación¹ o vía pública.

Fig. 2.2.- Fuentes potenciales de generación de RCD y su disposición.



RD: Residuos de Demolición.
RC: Residuos de Construcción.
RCD: Residuos de Construcción y Demolición.

Fuente: Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción

A consecuencia del manejo inadecuado de los residuos de la construcción y demolición, principalmente en la disposición final, que comúnmente se hace sin separar ni tratar, se han identificado diversos problemas ambientales, de imagen urbana y salud, destacando los siguientes:

- Obstrucción de arroyos, cañadas y barrancas.
- Afectación al drenaje natural.
- Azolve de las partes bajas e inundación de zonas aledañas en temporada de lluvias.
- Afectación al medio físico y medio biótico (flora y fauna).
- Focos de contaminación por mezcla de residuos, incluso peligrosos.
- Contaminación del suelo y subsuelo e incluso de acuíferos.
- Afectación de zonas de recarga de agua subterránea.
- Impacto visual del entorno.
- Proliferación de polvo (contaminación del aire) provoca enfermedades respiratorias.
- Proliferación de fauna nociva.

Actualmente los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD), son depositados en su mayoría en sitios inadecuados, como por ejemplo, barrancas, predios abandonados y vía pública. Otra parte es depositada en Rellenos Sanitarios, donde por sus características y volumen, provocan que se acorte la vida útil de estos sitios. Solo en una mínima parte, los residuos son depositados en sitios específicamente diseñados para este fin, aunque en muchos casos estos no cumplan con las características y requerimientos para el confinamiento de los residuos de la construcción.



Hasta el momento sólo se han podido identificar cuatro estados de la república que cuentan con sitios de disposición final autorizados entre los que se encuentran el Distrito Federal, Estado de México, Guanajuato y Baja California (ver tabla 2.1 “Gestión e Infraestructura de Manejo de los residuos de la construcción y demolición en México”), por lo que se deben crear sitios adecuados y centros de transferencia en gran parte del país, pero en mayor importancia, de centros de reciclaje para su tratamiento como el existente en la capital del país.

Para la determinación de las labores de gestión que se llevan a cabo y la infraestructura para el manejo de los residuos de la construcción existente en nuestro país, fueron consideradas únicamente a las 10 entidades federativas, que de acuerdo con la estimación de generación de residuos, producen la mayor cantidad. En contraste, también fue considerado al Estado de Campeche, debido a que es el de menor generación de residuos.

TABLA. 2.1.- Gestión e Infraestructura de Manejo de los residuos de la construcción y demolición en México.

Estado	Gestión		Sitio Disposición Final	Observaciones
	Recolección	Transporte	Especializado	
Nuevo León	X	X	No	No cuenta con padrón de prestadores de servicio para el manejo de RME. Deposito en sitios de disposición final de RSU. Tiro clandestino
Estado de México	✓	✓	Si	Cuenta con 14 SDF autorizados. Regula la recolección y transporte a través de la norma NTEA-011-SMA-RS-2008.
Jalisco	X	X	No	No cuenta con padrón de prestadores de servicio para el manejo de RME. Deposito en sitios de disposición final de RSU. Tiro clandestino
Veracruz	X	X	No	Cuenta con padrón de prestadores de servicio para el manejo de RME. Deposito en sitios de disposición final de RSU. Tiro clandestino
Distrito Federal	✓	✓	Si	Cuenta con 14 SDF autorizados ubicados en el Estado de México. Regula la recolección y transporte a través de la norma NADF-007-RNAT-2004. cuenta con un centro de transferencia Cuemanco y una planta de reciclaje privada (Concretos Reciclados, S.A. de C.V.)
Tamaulipas	X	X	No	No cuenta con padrón de prestadores de servicio para el manejo de RME. Deposito en sitios de disposición final de RSU. Tiro clandestino
Campeche	X	X	No	No cuenta con padrón de prestadores de servicio para el manejo de RME. Deposito en sitios de disposición final de RSU. Tiro clandestino
Guanajuato	✓	✓	Si (1) Irapuato	Cuenta con padrón de prestadores de servicio para el manejo de RME. También deposito en sitios de disposición final de RSU. Tiro clandestino.
Sinaloa	X	X	No	No cuenta con padrón de prestadores de servicio para el manejo de RME. Deposito en sitios de disposición final de RSU. Tiro clandestino
Tabasco	X	X	No	Se conocen las organizaciones, pero no están controladas. No cuenta con padrón de prestadores de servicio para el manejo de RME. Deposito en sitios de disposición final de RSU. Tiro clandestino.
Baja California	✓	✓	Si (2 Mexicali y 1 Ensenada)	Cuenta con padrón de prestadores de servicio para el manejo de RME. También deposito en sitios de disposición final de RSU. Tiro clandestino.

RSU: Residuos Sólidos Urbanos
RME: Residuos de Manejo Especial.
SDF: Sitio de Disposición Final.

Fuente: Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción



De acuerdo a lo observado en la tabla anterior, es evidente la necesidad de crear conciencia respecto al tema de los RCD, solo existe una planta de reciclaje en todo el país y solo en el Distrito Federal y el Estado de México existen 14 Sitios de Disposición Final (SDF) autorizados y que son compartidos entre ambos.

El 14 de octubre del 2015, se llevó a cabo el segundo encuentro de residuos e la construcción y demolición en el área de posgrado de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M., las instituciones que participaron en el evento fueron SEDEMA del D.F., Concretos reciclados, y la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción; en dicho evento se expuso la problemática sobre la disposición de los residuos de la construcción, se evidenciaron los aspectos más relevantes que propician la falta de interés y mala disposición de los residuos, a continuación se mencionan algunos de estos aspectos identificados por fases de manejo:

Sitios de disposición final

- No existen muchos sitios de disposición final autorizados.
- Los altos costos por disponer correctamente los residuos, encarecen el proyecto.
- Los sitios autorizados no emiten registros de lo que se recibe.
- Algunos no cuentan con el visto bueno de la Secretaria de Medio Ambiente.

Relacionados con el transporte

- Falta de regulación y normatividad a transportistas.
- Problemas con los sindicatos.
- Altos costos en acarreos.

Relacionados con el almacenamiento y separación

- Falta de espacio en obra
- Falta de planeación para la disposición inmediata en obra

Relacionados con el reciclaje de residuos.

- No existe infraestructura de reciclaje.
- Desconocimiento de sitios para recepción y aprovechamiento de residuos.

Sin embargo, también se detectaron aspectos relacionados con el comportamiento de la población y que al igual que los anteriormente mencionados, obstaculizan en gran medida la correcta disposición y utilización de los RCD. Las razones que a continuación se mencionan no permiten el progreso y desarrollo en cuanto al tema en cuestión:

- La falta de conciencia del público en general acerca de los problemas asociados con la eliminación incontrolada de los residuos: se debe informar y concientizar a la gente de las repercusiones de este tipo de conductas.
- La falta de aceptación por parte del público de que los residuos son recursos valiosos: los agentes generadores de RCD se encuentran dentro de la ideología de que son basura, no logran visualizar el gran potencial de estos materiales.
- La renuencia de la población a lidiar con los residuos: simplemente al ser material “inservible” lo que más se desea es deshacerse fácil y rápidamente de estos residuos.

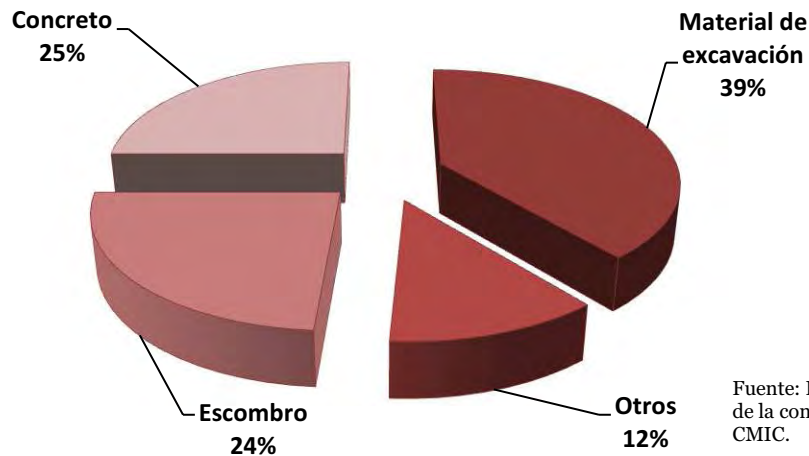


- La facilidad con que se presenta la eliminación de los residuos de manera ilegal ya que de manera legal representan varios costos y trámites, además de que en raras ocasiones se castiga este tipo de acciones.
- La falta de una política que sea clara en cuanto a la gestión de los RCD.
- La falta de tecnología, investigación, conocimientos técnicos y desarrollo de excelentes normas: a falta de lo anterior no se toma en cuenta la posible reutilización de los RCD y simplemente se prefiere deshacerse de ellos.
- La falta de un sistema nacional de información de residuos: en México no existe política alguna de información a la población sobre los beneficios de reciclaje, reutilización y reúso (RRR) de los RCD.

Durante el evento la empresa Concretos Recicladados S.A. de C.V., hizo hincapié en la poca aceptación que tienen los agregados reciclados por parte de las empresas constructoras, solo muy pocas empresas hacen uso de este material que en la mayoría de los casos son utilizados como material de relleno y en otros son usados para elaborar concretos de baja resistencia o subbases de concreto hidráulico o asfáltico.

En el manejo que actualmente se presta a los RCD, se incluyen las fuentes potenciales de generación y su disposición final (fig. 2.3), desde las pequeñas obras realizadas de auto construcción hasta las grandes obras, tanto privadas como públicas, ejecutadas por compañías constructoras. Una fuente de generación de RCD muy relevante, son los fenómenos naturales, cuya frecuencia por razones relacionadas con el cambio climático se ve incrementada. Se estima que actualmente sólo el 4% de los RCD que se generan, son aprovechados (3% reciclaje y 1% reúso).

Fig. 2.3.- Estimación de la caracterización de los RCD



2.2.- Contexto mundial sobre el manejo de los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD).

2.2.1.- En Europa.

La situación en cuanto el manejo de los RCD en Europa es la siguiente:



Holanda, Bélgica y Dinamarca superan la cifra del 90% de reciclaje para la fracción de concreto, ladrillos, tejas, etc., dentro de la corriente básica de RCD, y en concreto, Holanda y Bélgica, mantienen este altísimo grado de reciclaje para el resto de fracciones que componen la corriente de residuos básica, reciclando también el 100% del asfalto procedente del residuo de construcción en carreteras. Este elevado porcentaje de reciclaje se debe principalmente, a la escasez de materia prima para la obtención de agregados vírgenes, y la dificultad de encontrar lugares para vertederos, unidas a otras medidas de carácter legal y económico.

Finlandia, Austria y el Reino Unido, reciclan el 40-45% de los RCD y entre 50 y 76% (Austria y Finlandia) de los desechos de concreto, ladrillos, tejas, etc. Los factores que en estos países han impulsado el reciclaje, residen en una política de gestión de residuos que ha utilizado instrumentos de tipo económico (impuestos sobre el vertido) y legales (obligación de demoler selectivamente, acuerdos voluntarios, planificación y control).

Suecia, Alemania y Francia reciclan el 15-20% de los RCD. La baja cuota de reciclaje en Alemania contrasta con el elevado número de trituradoras operativas que hay en este país (1,000 con capacidad media de triturar 120,000 ton/año). Lo contrario sucede en Reino Unido, donde se estiman solamente entre 50-100 trituradoras y sin embargo reciclan el 45% de los RCD.

Italia e Irlanda reciclan entre el 6 y el 9% de los RCD, se encuentran impulsando el reciclaje de estos residuos.

Finalmente, Portugal, Grecia y España presentan una situación de reciclaje de RCD que puede calificarse de marginal.

2.2.2.- En América.

En los Estados Unidos, la reutilización y reciclaje de los RCD es una práctica integral que lleva a un objetivo aún más grande llamado la construcción sostenible o “verde”. El uso eficiente de los recursos es un principio fundamental de la construcción de edificios “verdes”. Esto significa la reducción, reutilización y reciclaje de la mayoría de los materiales que quedan después de un proyecto de construcción o renovación. Las prácticas “verdes” de construcción de edificios pueden incluir desde el rescate de la madera del proyecto, pasando por agregados recuperados de concreto triturado, molido o trozos de yeso para su reciclaje. En 38 estados de los Estados Unidos utilizan agregados de concreto reciclado para subbases viales y 11 lo reciclan en concreto nuevo.

El gobierno de México en coordinación con la SEDEMA y el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo del gobierno Alemán, desarrollaron un documento de diagnóstico básico de residuos de la construcción donde se destacan varios factores como su composición, clasificación y volúmenes de generación estimados, así como el programa de recolección de Residuos de la Construcción y el gasto anual por manejo de los mismos producto del tiro clandestino. De la misma forma, hace énfasis en los volúmenes producidos por el Estado de México (15,088 ton/día) y el Distrito Federal (12,000 ton/día) de los cuales solo se captan 3,000 toneladas diarias en el relleno sanitario del Bordo Poniente, terminando el resto en tiraderos clandestinos, barrancas, tiros de mina y cuerpos de agua, generando varios problemas ambientales.



En México solo existe una planta trituradora de concreto, ubicada en la Delegación Iztapalapa, cuenta con una capacidad operativa de 2,000 ton/día y de una capacidad de almacenaje de 3,000,000 ton.

Brasil es el primer país en América Latina donde se instala una planta de reciclaje de residuos de la construcción y demolición a partir de la resolución emitida por CONAMA No 307/2002 que entro en vigor en el 2003, la cual establece directrices, criterios y procedimientos para la gestión de los residuos de la construcción. Dicha resolución clasifica los residuos en cuatro clases:

I.- Clase A: son los residuos reutilizables o reciclables como agregados, tales como:

a) De construcción, demolición, reformas e reparación de pavimentación, de otras obras de infraestructura, inclusive suelos provenientes de terraplenes.

b) De construcción, demolición, reformas y reparación de edificaciones: componentes cerámicos (tejas, ladrillos, placas de revestimiento), mortero y hormigón;

c) De proceso de fabricación y/o demolición de prefabricados de concreto (bloques, tubos)

II.- Clase B: son los residuos reciclables para otros destinos, tales como: plásticos, papel/cartón, metales, vidrios, maderas y otros;

III.- Clase C: son los residuos para los cuales no han sido desarrolladas tecnologías o aplicaciones económicamente viables que permitan su reciclaje/recuperación, tales como los productos de yeso;

IV.- Clase D: son los residuos peligrosos originados de procesos de construcción, tales como: tintas, solventes, óleos y otros, o aquellos contaminados que provienen de demoliciones, reformas de clínicas radiológicas, instalaciones industriales y otros.

2.3.- Legislación y Normatividad sobre la disposición de los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD).

2.3.1.- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.

Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LEGEEPA, 2011) establece en el capítulo IV del Artículo 134 la prevención y control de la contaminación del suelo, en su título cuarto; Protección al Ambiente, que: “Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos” y “es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reúso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes”. Así mismo en su Artículo 137 capítulo cuarto manifiesta lo siguiente: “Queda sujeto a la autorización de los municipios o del Distrito Federal, conforme a sus leyes locales en materia y a las normas oficiales mexicanas que resulten aplicables, el funcionamiento de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reúso, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales”.



De tal manera que se concluye que la LEGEEPA transfiere toda la responsabilidad sobre el manejo de los residuos sólidos municipales al nivel local del gobierno, destacando la importancia en la reducción de la generación de RCD, reutilización y disposición final eficiente.

2.3.2.- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos:

Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003 con última reforma publicada el 19 de junio de 2007. Tiene como objetivo principal la prevención de la generación, valorización y gestión integral de los residuos peligrosos sólidos municipales, previniendo la contaminación de sitios con estos residuos llevando a cabo su recuperación.

2.3.3.- Reglamento de Construcción para el Distrito Federal.

De acuerdo a lo marcado por el Reglamento de Construcción para el Distrito Federal en cuanto a residuos sólidos maneja los siguientes artículos:

Art. 236.- “Con la solicitud de licencia de construcción especial para demolición considerada en el Título Cuarto de este Reglamento, se debe presentar un programa en el que se indicara el orden, volumen estimado y fechas aproximadas en que se demolerán los elementos de la edificación. En caso de prever el uso de explosivos, el programa señalara con toda precisión el o los días y la hora o las horas en que se realizaran las explosiones, que estarán sujetas a la aprobación de la Delegación”.

Art. 243.- “Los materiales, desechos y escombros provenientes de una demolición deben ser retirados en su totalidad en un plazo no mayor de 30 días hábiles, contados a partir del término de la demolición y bajo las condiciones que establezcan las autoridades correspondientes en materia de vialidad, transporte y sitio de disposición final”.

2.3.4.- Norma Ambiental del Distrito Federal NADF-007-RNAT-2013

Para efectos específicos de Residuos de Construcción y Demolición existe La Norma Ambiental NADF-007-RNAT-2013, la cual establece la clasificación y especificaciones para el manejo de los residuos de la construcción en el Distrito Federal, optimizar su control, fomenta su aprovechamiento y minimizar su disposición final inadecuada, de las cuales es importante considerar los siguientes puntos:

- Los generadores de residuos de la construcción y demolición hasta 3 m³ deberán dar aviso a la delegación del inicio de obra y entregar sus residuos en un centro de acopio o reciclaje autorizado.
- Los generadores de residuos de la construcción y demolición de más de 3 y hasta 7 m³ deberán dar aviso a la delegación, informando sobre el inicio de obra y los residuos generados.
- Los generadores de residuos de la construcción y demolición de más de 7 m³ presentarán su plan de manejo ante la Secretaría para su evaluación y autorización, de conformidad con los formatos que para el efecto establezca y ponga a disposición la Secretaría.



- Los generadores de residuos de la construcción y demolición de más de 80 m³ deberán de presentar, además de los requerimientos de la Secretaría, la formulación de los Planes de Manejo que para tal efecto establece la NOM-161-SEMARNAT-2011.
- El generador de RCD en conjunto con el prestador de servicios deberá comprobar mediante un manifiesto de entrega recepción el destino final de la totalidad de los residuos generados.
- Para el aprovechamiento de los RCD (concretos, cerámicos, morteros, etc.) se considera reciclar por lo menos un 30% de estos durante el primer año de aplicación de la norma, incrementando así un 15% anual hasta conseguir un 100% de reciclaje.
- De acuerdo con el Código Penal del Distrito Federal, Art. 344 se establece que para una producción a partir de 3 m³ de volumen de cascajo depositado ilícitamente en barrancas, áreas verdes, áreas de valor ambiental, áreas naturales protegidas, serán las siguientes sanciones:
 - ✓ 1 a 5 años de prisión y 300 a 1,500 SMD (menos de 3 m³).
 - ✓ 3 a 9 años de prisión y 1,000 a 5,000 SMD (más de 3 m³).

2.3.5.- NOM-161-SEMARNAT-2011.

Norma de carácter obligatorio, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1 de febrero de 2013, cuya validez entro en vigor a partir del mes de agosto del mismo año. “Establece los criterios para clasificar los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo; listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de planes de manejo”. Cabe señalar que para el caso específico de los RCD, la norma establece como generador aquel cuya producción supera los 80 m³.

Se puede decir que nuestro país se encuentra en una etapa inicial en cuestión de reciclaje y aprovechamiento de recursos. México se está iniciando en la planificación de medidas legales para el manejo, reutilización y reciclaje de los RCD, sin embargo, estas medidas resultan aún insuficientes. En la realidad, México presenta carencias ambientales, culturales y de aprovechamiento de recursos, donde se cree que la sustentabilidad en la industria de la construcción es un tema inalcanzable; pensando que los beneficios ambientales que estas normalizaciones traen consigo, implica en los involucrados elevados costos, largos procesos y una ruptura con el sistema tradicional de manejo de residuos.

Es evidente que un porcentaje muy bajo de los RCD generados diariamente son tratados de manera adecuada, donde la mayoría de estos terminan en rellenos sanitarios cuando existe algún proceso de tratamiento por llamarle de alguna manera. Al realizar estos depósitos no solo se está perdiendo o desaprovechando energía y material potencialmente reutilizable, reciclables o valorizables, sino que se afecta de manera negativa al entorno.



2.4.- Conclusión capitular

El concreto es un material que se utiliza de manera creciente en todo el mundo, consecuentemente los residuos de la construcción y demolición se generan con una mayor frecuencia. En nuestro país no existe la conciencia suficiente para entender que el reciclaje de los RCD es conveniente por razones económicas y ambientales; solo en el Distrito Federal y el Estado de México existe Normatividad aplicable, resultando necesario que otras entidades promulguen normas similares. Adicionalmente se requiere impulsar e incentivar esta actividad económica con la finalidad de incrementar la infraestructura para el reciclaje de los RCD.

Del presente capítulo se desprenden algunos aspectos importantes que se deben considerar para lograr una mejor incorporación de los materiales reciclados en la industria de la construcción:

- Fomentar el uso de materiales reciclados sobre los naturales, para lo cual será necesario establecer la obligatoriedad del uso de materiales reciclados en los contratos de obra pública e incluirlos en los catálogos de conceptos.
- En cualquier tipo de obra que necesite o no licencia de construcción, se deberá establecer un plan de manejo de los residuos de la construcción y/o demolición y deberá existir una vigilancia estrecha para garantizar el cumplimiento de los mismos.
- Estudiar exhaustivamente tanto las propiedades físicas y mecánicas de los agregados reciclados para diferentes usos, así como el empleo de aditivos para el mejoramiento de las primeras.
- Es necesario que los laboratorios de materiales se actualicen en el manejo de pruebas correspondientes a materiales reciclados.
- Elaboración de una guía de agregados reciclados procedentes de residuos de la construcción y/o demolición (RCD).



CAPÍTULO III.- CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS RECICLADOS

3.1.- Muestreo de los agregados reciclados.

Mediante la donación de material que realizó la empresa Concretos reciclados S.A. de C.V. (fig. 3.1), es cómo fue posible el llevar a cabo la presente trabajo. La empresa se encuentra ubicada en la Colonia El Triángulo Delegación Iztapalapa, es la primera y única empresa en México dedicada al tratamiento de los RCD y que se encuentra en operación desde hace 12 años.

Previo a una entrevista que se tuvo con el gerente de la planta, fue como se pudo realizar el muestreo de los agregados, bajo la premisa de tomar lo necesario para el desarrollo de la investigación. Dentro de la planta se ubicaron los conos de material, tanto de grava como de arena tomando como muestra cinco costales de cada material, el tamaño de la grava es de 3/8” (fig.3.2).



Fig. 3.1.- Planta de tratamiento de RCD, Concretos reciclados S.A. de C.V.



Fig. 3.2.- Cono de grava reciclada cuyo tamaño nominal es de 3/8”.

Para trasladar el material hasta las instalaciones del laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M., se tuvo que contratar una camioneta para transportar el material. Una vez ingresado el material en el laboratorio, fue colocado dentro de los nichos que se tienen reservados para resguardar el material de diversos estudiantes (fig. 3.3).

El caucho en polvo y en granulo, fue adquirido en la empresa “Genbruger”, ubicada en la Colonia Cuchilla del Tesoro, Del. Gustavo A. Madero, dicha empresa se encuentra dedicada al suministro de productos elaborados a base de caucho, principalmente pisos. Para el desarrollo de la investigación se adquirió un bulto de 30 Kg de caucho en polvo y un bulto de 30 Kg de caucho en granulo, cuyo tamaño oscila entre 3 a 5 mm.

Al igual que los primeros agregados, los bultos de caucho se trasladaron al laboratorio y se almacenaron en los nichos anteriormente mencionados.



Fig. 3.3.- Nicho para el almacenaje de materiales.

3.2.- Preparación de los agregados

Antes de comenzar con la caracterización de los agregados reciclados, se procedió a preparar la cantidad suficiente de material para realizar las pruebas de granulometría, masa volumétrica, contenido de materia orgánica y masa específica; el muestreo se realizó mediante cuarteo mecánico (fig. 3.4) como se indica en la norma NMX-C-170-ONNCCE-1997 con ello se obtuvo una cantidad estimada que consiste en 11 Kg de grava y 9 Kg de arena. Posteriormente al cuarteo el material se introdujo en un horno a 100°C por 24 horas (fig. 3.5).



Fig. 3.4.- Cuarteo mecánico de los agregados reciclados.



Fig. 3.5.- Secado en horno de los agregados reciclados.

3.3.- Análisis granulométrico

El análisis granulométrico se realizó tomando como referencia las normas NMX-C-077-ONNCCE-1997 y NMX-C-111-ONNCCE-2004, cabe mencionar que el cribado se realizó de forma manual debido a que en el laboratorio no se cuenta con el equipo de cribado mecánico, por esta razón y a que los agregados son reciclados surgió la incertidumbre en cuanto a la certeza del análisis granulométrico por lo que se decidió realizar 3 granulometrías en el caso de la grava (fig. 3.6 y 3.7) y 4 en el caso de la arena (fig. 3.9 y 3.8); obteniéndose al final resultados muy similares. A continuación se muestran dos análisis granulométricos de cada agregado:

Tabla 3.1.- Granulometría agregado grueso reciclado (muestra 1)

No. Malla	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% que pasa la malla	Lim. Inferior	Lim. Superior
1/2" (12.5mm)	0	0	0	100	100	100
3/8" (9.5mm)	253	12.7	12.7	87.3	85	100
No. 4 (4.75mm)	1476	74.1	86.8	13.2	10	30
No. 8 (2.36mm)	242	12.1	98.9	1.1	0	10
No. 16 (1.18mm)	2	0.1	99.0	1.0	0	5
PASA No. 16	19	1.0	100	0		
SUMA	1992	100				

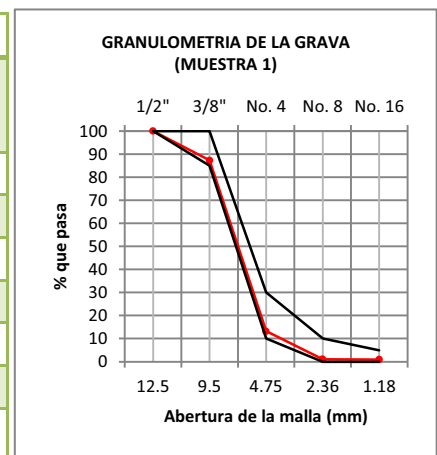


Tabla 3.2.- Granulometría agregado grueso reciclado (muestra 2)

No. Malla	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% que pasa la malla	Lim. Inferior	Lim. Superior
1/2" (12.5mm)	4	0.2	0.2	99.8	100	100
3/8" (9.5mm)	218	10.9	11.1	88.9	85	100
No. 4 (4.75mm)	1451	72.8	84.0	16.0	10	30
No. 8 (2.36mm)	291	14.6	98.6	1.4	0	10
No. 16 (1.18mm)	6	0.3	98.9	1.1	0	5
PASA No. 16	22	1.1	100	0		
SUMA	1992	100				

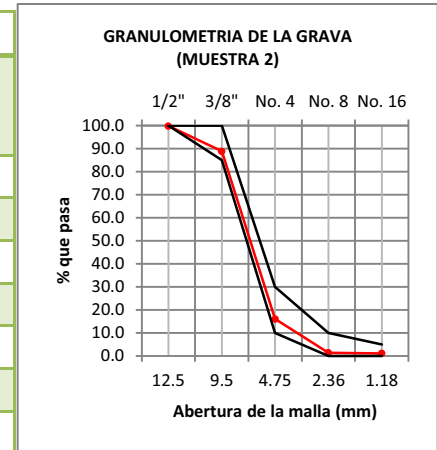


Fig. 3.6.- Distribución de las partículas del agregado grueso posterior al cribado (**Muestra 1**), de izquierda a derecha se tienen los tamaños 3/8”, No.4, No.8, No.16 y lo que pasa No.16.



Fig. 3.7.- Distribución de las partículas del agregado grueso posterior al cribado (**Muestra 2**), de izquierda a derecha se tienen los tamaños 1/2”, 3/8”, No.4, No.8, No.16 y lo que pasa No.16.

Tabla 3.3.- Granulometría agregado fino reciclado (muestra 1)

No. Malla	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% que pasa la malla	Lim. Inferior	Lim. Superior
No. 4 (4.75mm)	75	5.0	5.0	95.0	95	100
No. 8 (2.36mm)	520	34.8	39.8	60.2	80	100
No. 16 (1.18mm)	272	18.2	58.0	42.0	50	85
No. 30 (0.6mm)	164	11.0	69.0	31.0	25	60
No. 50 (0.3mm)	122	8.2	77.2	22.8	10	30
No. 100 (0.15mm)	129	8.6	85.8	14.2	2	10
PASA No. 100	212	14.2	100	0		
SUMA	1494	100	M.F. = 3.35			

GRANULOMETRIA DE LA ARENA (MUESTRA 1)

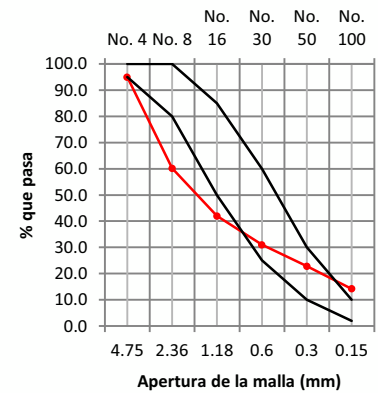


Tabla 3.4.- Granulometría agregado fino reciclado (muestra 2)

No. Malla	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% que pasa la malla	Lim. Inferior	Lim. Superior
No. 4 (4.75mm)	83	5.6	5.6	94.4	95	100
No. 8 (2.36mm)	527	35.4	40.9	59.1	80	100
No. 16 (1.18mm)	268	18.0	58.9	41.1	50	85
No. 30 (0.6mm)	156	10.5	69.4	30.6	25	60
No. 50 (0.3mm)	114	7.7	77.0	23.0	10	30
No. 100 (0.15mm)	103	6.9	84.0	16.0	2	10
PASA No. 100	239	16.0	100	0		
SUMA	1490	100	3.36	= M.F.		

GRANULOMETRIA DE LA ARENA (MUESTRA 2)

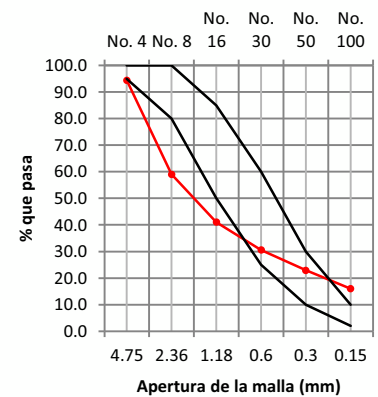


Fig. 3.8.-Distribución de las partículas del agregado fino posterior al cribado (**Muestra 1**), de izquierda a derecha se tienen los tamaños No.4, No.8, No.16, No.30, No.50, No.100 y lo que pasa No.100.



Fig. 3.9.- Distribución de las partículas del agregado fino posterior al cribado (**Muestra 2**), de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se tienen los tamaños No.4, No.8, No.16, No.30, No.50, No.100 y lo que pasa No.100.

3.4.- Contenido de materia orgánica.

Es de gran importancia determinar el contenido de materia orgánica en el agregado reciclado y aún más importante a los agregados provenientes de una planta trituradora, ya que en esta convergen distintos tipos de concreto de diversos orígenes y con diversos agentes contaminantes como lo son las arcillas, limos y principalmente materia orgánica.

Para la realización de esta prueba se tomó como referencia la norma NMX-C-088-ONNCCE-1997, esta prueba es un índice de contaminación y proporciona una advertencia sobre el uso de agregado fino antes de continuar efectuando ensayos posteriores (fig. 3.10 y 3.11).

Se realizaron dos ensayos de 250 gramos cada uno para la arena reciclada y un ensayo con 350 gramos para la grava. Las muestras se sumergieron en una solución al 3% de hidróxido de sodio (sosa caustica); esto es, 3 partes en masa de hidróxido de sodio disueltas en 97 partes en masa de agua.



Fig. 3.10.- Del lado izquierdo se observa que la solución de hidróxido de sodio presenta un color oscuro después de haber sumergido agregado fino por 24 horas.



Fig. 3.11.- Del lado derecho se observa que la solución de hidróxido de sodio presenta un color más claro después de haber sumergido agregado grueso por 24 horas.



Desafortunadamente en este ensayo se observó que la arena reciclada contiene demasiada materia orgánica, por lo que se considera no apta para la fabricación de concreto debido a los problemas subsecuentes que esto origina; por otra parte, la grava presenta muy poca contaminación por lo que se considera adecuada para la elaboración de concreto.

Por decisión personal se decidió continuar con los ensayos sobre el agregado fino, a fin de tener una referencia sobre las características que presenta este tipo de arena proveniente de una planta recicladora; posteriormente se pretende utilizar en la elaboración de concreto para la fabricación de adoquines y documentar el comportamiento de la mezcla y el desempeño mecánico de los adoquines.

3.5.- Contenido de pasta de cemento adherido al agregado grueso.

Durante la manipulación del agregado grueso se observó que el mortero adherido se disgrega o se desprende, ocasionando con ello un incremento de partículas finas que pueden influir notablemente en el diseño del concreto. Por lo anterior resulta necesario determinar la cantidad aproximada de mortero adherido al agregado grueso y con ello tomar las previsiones necesarias al momento de diseñar las mezclas.

La norma NMX-C-154-ONNCCE-2010 “Determinación del contenido de cemento en concreto endurecido”, nos da noción de como poder obtener el contenido de pasta en el agregado grueso, sin embargo, debido a que en el presente trabajo se trabajan con agregados reciclados, y por ende la composición es muy variada, lo mejor es realizar el ensaye tomando como referencia investigaciones realizadas por otros autores y que son similares a lo que se pretende realizar en el presente trabajo.

Para realizar este ensaye se propuso utilizar ácido muriático con el propósito de disolver el mortero adherido al agregado grueso (fig. 3.12). El ácido muriático es una disolución acuosa del gas cloruro de hidrogeno, es muy corrosivo y se presenta como un líquido transparente ligeramente amarillo; tiene diversos usos tanto industriales como domésticos.

Se realizaron tres ensayos con 150 g, 250 g y 350g de agregado grueso respectivamente, en los cuales el material fue sumergido en ácido muriático y se dejó reposar por 48 horas, con la finalidad de que el mortero se disolviera completamente dejando únicamente las partículas de agregado pétreo.



Fig. 3.12.- Del lado izquierdo preparación de las muestras y del lado derecho se observa el agregado grueso después de 48 horas de haberse sumergido en ácido muriático.



Pasadas las 48 horas se procedió a lavar con abundante agua el agregado grueso a fin de eliminar por completo los residuos de ácido muriático (fig. 3.13), una vez que se terminó de lavar, el agregado grueso se puso a secar en la estufa hasta eliminar toda la humedad contenida en el material. Así, para el cálculo de contenido de pasta o mortero adherido al agregado grueso se utilizó la siguiente expresión:

$$\% \text{ Pasta} = \frac{W_{si} - W_{sf}}{W_{si}} \times 100$$

Dónde:

W_{si} = Peso seco inicial

W_{sf} = Peso seco final

De los ensayos que se realizaron se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3.5.- Contenido de pasta de cemento adherido al agregado grueso.

No de muestra	Peso de la muestra seca W_{si} (gr)	Peso seco sin finos W_{sf} (gr)	$W_{si} - W_{sf}$	$(W_{si} - W_{sf}) / W_{si}$	% Pasta	Promedio
1	150	108	42	0.28	28	36%
2	250	153	97	0.39	39	
3	350	206	144	0.41	41	



Fig. 3.13.- Después de lavar el agregado grueso a fin de eliminar los residuos de ácido muriático y mortero, se puede observar claramente los distintos tipos de material que convergen en la trituración de los residuos de la construcción.

3.6.- Masa volumétrica

Para obtener la masa volumétrica de los agregados reciclados se tomó como referencia la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004. La masa volumétrica de un material es la masa del material necesaria para llenar un recipiente de volumen unitario. En la masa unitaria además del volumen de las partículas del agregado se tienen en cuenta los vacíos que hay entre partículas.

La masa unitaria puede determinarse compactada o suelta; la masa unitaria compactada se emplea en algunos métodos de dosificación de mezclas y la masa unitaria suelta sirve para estimar la cantidad de agregados a comprar si estos se venden por volumen (volumen suelto) como ocurre comúnmente.



Debido a que los agregados son reciclados, se propone realizar tres ensayos de masa volumétrica compacta y suelta, lo anterior con la finalidad de tener un promedio de los resultados y así tener una mayor certeza en cuanto a los resultados arrojados por tales ensayos.

En la siguiente tabla se muestra la masa volumétrica suelta y compacta que se obtuvieron de los agregados reciclados:

Tabla 3.6.- Masa volumétrica de loa agregados reciclados.

MASA VOLUMETRICA		MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO	UNIDAD
ARENA RECICLADA						
MASA VOLUMETRICA SECA SUELTA	Masa del recipiente vacío	1.132	1.132	1.132		Kg
	Volumen del recipiente	0.002848	0.002848	0.002848		m ³
	Masa del recipiente lleno de material suelto	4.85	4.90	4.90		Kg
	Masa neta del material suelto	3.718	3.768	3.768		Kg
	Masa volumétrica suelta	1305.48	1323.03	1323.03	1317.18	Kg/m ³
MASA VOLUMETRICA SECA COMPACTA	Masa del recipiente vacío	1.132	1.132	1.132		Kg
	Volumen del recipiente	0.002848	0.002848	0.002848		m ³
	Masa del recipiente lleno de material compacto	5.15	5.15	5.15		Kg
	Masa neta del material compacto	4.018	4.018	4.018		Kg
	Masa volumétrica compacta	1410.81	1410.81	1410.81	1410.81	Kg/m ³
GRAVA RECICLADA						
MASA VOLUMETRICA SECA SUELTA	Masa del recipiente vacío	4.504	4.504	4.504		Kg
	Volumen del recipiente	0.0102	0.0102	0.0102		m ³
	Masa del recipiente lleno de material suelto	15.90	15.95	15.90		Kg
	Masa neta del material suelto	11.396	11.446	11.396		Kg
	Masa volumétrica suelta	1117.25	1122.16	1117.25	1118.89	Kg/m ³
MASA VOLUMETRICA SECA COMPACTA	Masa del recipiente vacío	4.504	4.504	4.504		Kg
	Volumen del recipiente	0.0102	0.0102	0.0102		m ³
	Masa del recipiente lleno de material compacto	16.50	16.55	16.50		Kg
	Masa neta del material compacto	11.996	12.046	11.996		Kg
	Masa volumétrica compacta	1176.08	1180.98	1176.08	1177.71	Kg/m ³

3.7.- Masa específica (densidad) y absorción.

Las partículas del agregado están conformadas por masa del agregado, vacíos que se comunican con la superficie llamados poros permeables o saturables y vacíos que no se comunican con la superficie, es decir que quedan en el interior del agregado llamados poros impermeables o no saturables; de acuerdo con lo anterior tenemos tres densidades a saber:

Densidad real: Masa promedio de la unidad de volumen de las partículas del agregado, excluyendo sus poros permeables o saturables y los no saturables o impermeables.

Densidad nominal: Masa promedio de la unidad de volumen de las partículas del agregado, excluyendo únicamente los poros permeables o saturables.

Densidad aparente: Masa promedio de la unidad de volumen de las partículas del agregado, incluyendo tanto poros permeables o saturables como poros impermeables o no saturables (volumen aparente o absoluto).

Si la masa de agregado se determina con material seco tendríamos densidad aparente seca, pero si la masa del agregado se determina con material saturado y superficialmente seco (S.S.S), tendríamos densidad aparente saturada.

De los tres tipos de densidades antes definidas, la **densidad aparente** es la que se emplea en el diseño de mezclas de concreto, porque se parte que el material primero se satura, es decir, todos los poros permeables de cada partícula quedan llenos de agua y el agua adicional a éste estado (agua libre) es la que reacciona con el cemento; si la densidad del agregado que se toma en el diseño es la aparente saturada las masas que se calculen del agregado serán masas saturadas, pero si se toma para dosificación de mezclas la densidad aparente seca las masas que se determinen del agregado serán masas secas.

Para obtener la densidad y la absorción del agregado grueso se tomó como referencia la norma NMX-C-164-ONNCCE-2002 y para el caso del agregado fino la norma NMX-C-165-ONNCCE-2004. Dada la naturaleza y origen de los agregados se optó por realizar tres ensayos en caso de la grava (fig. 3.14 y 3.15) y cuatro para la arena.



Fig. 3.14.- Determinación de la densidad de la grava mediante el uso del picnómetro de sifón.



Fig. 3.15- Secado en fuego del agregado grueso en estado s.s.s. para determinar la absorción.

A continuación se muestran los resultados que se obtuvieron después de realizar el ensaye de masa específica y de absorción en el agregado grueso:

Tabla 3.7.- Masa específica y absorción del agregado grueso reciclado.				
MASA ESPECIFICA				
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	FORMULA
Peso de la muestra (gr)	1000	1000	1000	$M_{ess} = \frac{M_{sss}}{V_a} \frac{(Kg)}{(dm^3)}$
Volumen desalojado (ml)	442.5	442	443	
Resultado	2.260	2.262	2.257	
Promedio	2.26			
ABSORCION				
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	FORMULA
Peso de la muestra sss (gr)	500	500	500	$A = \frac{P_{sss} - P_s}{P_s} \times 100$
Peso de la muestra seca (gr)	463	464	465	
Resultado (%)	7.99	7.76	7.53	
Promedio	7.76			

En caso de la arena resultado más complicado el poder lograr que se llegara al estado saturado superficialmente seco (s.s.s), debido a la presencia de una cantidad excesiva de material fino (fig.3.16), después de haber dejado saturar la arena por 24 horas, esta presentaba un aspecto arcilloso (lodo); posteriormente durante el procedimiento para llevar el material al estado s.s.s. se observó que las partículas finas encapsulaban a las partículas más gruesas formándose con ello pequeñas bolitas que guardaban en su interior pequeñas cantidades de agua (fig. 3.17 y 3.18), ocasionando incertidumbre en cuanto a la validez de los resultados obtenidos en el frasco Chapman.



Fig. 3.16.- Apariencia de la arena reciclada después de ser sumergida en agua por 24 horas para que fuera saturada.



Fig. 3.17.- Obtención de la densidad de la arena en estado s.s.s. a través del frasco Chapman

La presencia de grandes cantidades de material fino en la arena, dificulta que se elimine el agua excedente para lograr un estado s.s.s., esto puede ocasionar que durante la elaboración de concreto sea necesario adicionar agua a lo requerido por el diseño de la mezcla, ya que como se observó, el material fino resulta muy absorbente.

Por las condiciones del material y debido al comportamiento de este, resultado necesario repetir el ensaye 3 veces más para verificar si los resultados obtenidos eran confiables, a continuación se muestra la densidad y absorción del agregado fino:

Tabla 3.8.- Masa específica y absorción del agregado fino reciclado.

MASA ESPECIFICA					
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4	FORMULA
Peso de la muestra (gr)	500	500	500	500	$M_{ess} = \frac{M_{sss}}{V_f - V_i} \frac{(Kg)}{(dm^3)}$
Volumen inicial (ml)	200	200	200	200	
Volumen final (ml)	429	431	429.5	426	
Volumen desalojado (ml)	229	231	229.5	226	
Resultado	2.18	2.16	2.18	2.21	
Promedio	2.18				
ABSORCION					
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4	FORMULA
Peso de la muestra sss (gr)	500	500	500	500	$A = \frac{P_{sss} - P_s}{P_s} \times 100$
Peso de la muestra seca (gr)	444	441	443	441	
Resultado (%)	12.61	13.38	12.87	13.38	
Promedio	13.06				



Fig. 3.18.- Arena reciclada en estado saturado superficialmente seco.

En la imagen se puede apreciar el apelmazamiento del material fino con el más grueso que se encuentra contenido en la arena, formándose pequeñas bolitas las cuales son complejas de disgregarse ya que se endurecían conforme la humedad se perdía.

En las arenas de mina este fenómeno no se presenta, pues al ser un material producto de la trituración de una roca o de un banco cuyo material es homogéneo, el contenido de partículas finas es mínimo.

En cambio la arena que es producto de la trituración de residuos de la construcción, bloques de concreto y mampostería principalmente, contiene grandes cantidades de material fino que pueden ser limos, arcillas, mortero; por lo anterior se debe tener mucho cuidado si se requiere utilizar este tipo de arenas para la elaboración de concreto.

Después de secar en fuego la arena en estado s.s.s. para obtener la absorción, se observó que el material apelmazado se encontraba endurecido (fig. 3.19) por lo que se procedió a disgregar en la mayor medida posible todas aquellas partículas apelmazadas, al separar el material fino de las partículas más gruesas, se encontró que las pequeñas bolitas formadas aun guardaban en su interior humedad (fig. 3.20), siendo lo anterior un factor que puede afectar la exactitud de los resultados obtenidos.



Fig. 3.19.- Arena reciclada seca en fuego, aparentemente se observa que el material se encuentra totalmente seco.



Fig. 3.20.- Al separar el material fino del más grueso se observa que aún existe humedad en el interior de las partículas apelmazadas.

Para finalizar el presente capítulo, a continuación se muestra un resumen en la siguiente tabla en donde se pueden apreciar las características físicas obtenidas de los agregados reciclados:

Tabla 3.9.- Resumen de las características de los materiales

Material	Masa Específica Kg/m ³	Masa Volumétrica Kg/m ³	Módulo de Finura	T.M.A.	Absorción %	Humedad % 480 Kg/cm ²	Humedad % 420 Kg/cm ²	Humedad % 350 Kg/cm ²	Humedad % 360 Kg/cm ²	Humedad % 250 Kg/cm ²
Agua	1000	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Cemento	3150	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Grava Reciclada	2260	1177.71	-----	3/8"	7.76	1.8	1.5	1.7	1.5	1.5
Arena Reciclada	2180	1410.81	3.5	-----	13.06	2		2		
Arena de Mina	2140	1366.92	2.2	-----	12.36		1		1	3.89

3.8.- Conclusión capitular

El uso de agregados reciclados producidos a partir de la trituración de RCD, ocasionan gran incertidumbre en cuanto a las características mecánicas que estos poseen; sin embargo, el conocer a detalle las características y comportamiento de los agregados incrementará la certeza sobre el uso de estos para la fabricación de concreto, por esta razón se determinó realizar ensayos repetidos a los agregados con la finalidad de obtener datos más confiables.

Tal y como lo describen diversos autores de investigaciones relacionadas con el uso de agregados reciclados, estos suelen poseer una mayor absorción en comparación con agregados naturales, además el contenido de pasta de cemento adherido se encuentra entre un 30% y 36% de la masa total del agregado.



Si suponemos una resistencia a compresión de una roca sana extraída de una mina, tendríamos que ese tipo de roca soporta una fuerza a compresión de “x”, no obstante la roca se tritura y se utiliza como agregado (conservando su resistencia “x”) para fabricar concreto, en tal proceso el mortero o pasta de cemento se adhiere a las partículas de la roca para formar una roca artificial; cuando se tritura esta roca artificial o concreto para producir agregado entonces ya no se tendría el 100% de la resistencia “x” con la que se contaba desde un principio, si no que en realidad se tendría 100% menos el 36% que corresponde a la cantidad de mortero adherido en el agregado.

Adicionalmente se tiene la gran diversidad de rocas que convergen en el agregado reciclado (basalto, andesita, tezontle, caliza, etc.), por lo que la resistencia de cada una es variada.

Dicho en otras palabras, los agregados producidos a partir de los residuos de la construcción y demolición, poseen una menor resistencia a la compresión que los agregados naturales.



CAPÍTULO IV.- DISEÑO DE MEZCLAS



4.1.- Diseño de mezclas de concreto por el método de ACI

De acuerdo al uso que se destinan, los adoquines deben satisfacer los requisitos de resistencia establecidos en la norma NMX-C-314-ONNCCE-2014 y que aparecen en la siguiente tabla:

Tabla. 4.1.- Resistencia a compresión de los adoquines

Tipo	Resistencia media Mpa (Kg/cm ²)	Resistencia mínima individual Mpa (Kg/cm ²)
A	29.4 (300)	24.5 (250)
B	39.2 (400)	35.3 (360)
C	44.1 (450)	39.7 (405)
D	55.0 (560)	50.0 (510)

Se tiene contemplado fabricar adoquines de tipo A, B y C, se tomara como referencia la resistencia mínima individual para cada tipo de adoquín en el diseño de las mezclas. Cabe aclarar que no existe información similar previa sobre el tipo de mezclas a realizar; de acuerdo con diversos autores, los concretos elaborados con agregados 100% reciclados, tienden a presentar resistencias bajas.

Como se observó en la tabla anterior, al adoquín tipo C, es el que mayor resistencia requiere en comparación de los dos primeros tipos, debido a ello surge la incertidumbre en cuanto lograr dicha resistencia, pues el concreto ya se considera como de alta resistencia, tal y como se menciona en diversas literaturas los concretos de alta resistencia parten de una $f'c = 400\text{Kg/cm}^2$.

A causa de lo anteriormente mencionado, se propuso tomar como resistencia de diseño una $f'c = 480\text{Kg/cm}^2$ y una $f'c = 420\text{Kg/cm}^2$ para la fabricación de adoquines tipo C, en el caso de los adoquines tipo A y B, se toma como referencia el $f'c$ especificado por la norma.

El método que se utilizó para el diseño de las mezclas fue el descrito por el ACI (American Concrete Institute); es de gran importancia aclarar que los agregados reciclados resultan ser muy absorbentes y por esta razón se debe tener mucho cuidado al realizar el cálculo de corrección de agua por absorción, puesto que durante el cálculo el incremento de absorción implica al final un incremento de agua y no lo contrario como comúnmente sucede.

Para diseñar una mezcla de concreto es necesario conocer: el peso específico del cemento, de la arena y de la grava; la relación agua/cemento en peso, el módulo de finura del agregado fino y la clasificación por tamaño del agregado grueso; propiedades que se obtuvieron en el capítulo anterior.

En resumen, se diseñaron cuatro mezclas por el método del ACI 211 en el cual se utilizaron agregados reciclados, las dosificaciones correspondientes para cada mezcla se muestran en la siguiente tabla:



Tabla. 4.2.- Cantidades de material requerido para fabricar Concretos con Agregados Reciclados (CAR)

Tipo de adoquín	f'c de diseño (Kg /cm ²)	Nomenclatura de la mezcla	Cantidad de material requerido por m ³ de concreto			
			Agua Kg/m ³	Cemento Kg/m ³	Grava Kg/m ³	Arena Kg/m ³
C	480	CAR-1	331	691	589	637
C	420	CAR-2	333	505	612	774
B	360	CAR-3	338	440	612	818
A	250	CAR-4	321	334	612	890

Posteriormente para los concretos adicionados con caucho, se tomó como referencia de diseño una f'c de 350 y 250 Kg/cm², diversas investigaciones han determinado que el concreto adicionado con caucho, disminuye la resistencia final de forma considerable, sin embargo por otra parte, el caucho mejora otras cualidades en el concreto, tal como la elasticidad y resistencia al desgaste.

Se diseñaron dos mezclas por el método del ACI 211 en el cual se utilizaron agregados reciclados y otras dos mezclas en donde se cambió el agregado fino reciclado por arena de mina, el caucho se incorporó en las dosificaciones sustituyendo el 12% o 25% en masa de los agregados. En la siguiente tabla se muestran las cantidades utilizadas:

Tabla. 4.3.- Cantidades de material requerido para fabricar Concretos con Agregados Reciclados y Caucho (CARyC)

f'c de diseño (Kg /cm ²)	Nomenclatura de la mezcla	Caucho en granulo y polvo	Cantidad de material requerido por m ³ de concreto						
			Agua Kg/m ³	Cemento Kg/m ³	Grava Kg/m ³	Arena reciclada Kg/m ³	Arena de mina Kg/m ³	Caucho granulo Kg/m ³	Caucho polvo Kg/m ³
350	CARyC-1	12%	348	475	337.84	807.84		53.76	110.16
350	CARyC-2	25%	348	475	218.5	688.5		112	229.5
350	CARyC-3	25%	348	475	445.58		623.25	148.86	207.75
250	CARyC-4	12%	321	334	538.56		783.2	73.44	106.8

Como se sabe, la humedad es una característica que se obtiene momentos antes de realizar la mezcla, pues la humedad del medio ambiente finalmente influye en la cantidad de agua contenida en los agregados.

En el siguiente apartado se muestran las tablas establecidas por el ACI 211 para el diseño de mezclas de concreto, las cuales son la base fundamental para poder diseñar las mezclas con las resistencias propuestas.



TABLA 4.4.- Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado

Revenimiento, cm	Agua, Kg/m ³ concreto para TMG, mm							
	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
	Concreto sin aire incluido							
De 2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
De 7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
De 15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	
	Concreto con aire incluido							
De 2.5 a 5.0	181	175	168	160	150	142	122	107
De 7.5 a 10	202	193	184	175	165	157	133	119
De 15 a 17.5	216	205	197	174	174	166	154	
Promedio recomendado de aire por incluir por exposición								
Exposición ligera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

TABLA 4.5.- Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto

Resistencia a la compresión a los 28 días Kg/cm ²	Relación agua / cemento por peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	-----
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Fuente: American Concrete Institute

TABLA 4.6.- Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

Tamaño máximo de agregado, mm	Volumen de agregado grueso varillado en seco, por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de la arena			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (3/8")	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53
19 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.6
25 (1")	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 1/2")	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2")	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3")	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6")	0.87	0.85	0.83	0.81

Con el fin de ejemplificar el diseño de una mezcla de concreto mediante el uso de las tablas anteriormente mostradas (método ACI), a continuación se muestra el desarrollo de la metodología para el diseño de una mezcla de concreto.



4.2.- Ejemplo de diseño

Diseñar una mezcla de concreto cuya resistencia requerida es 420Kg/cm² con un revenimiento aproximado de 2.5 a 5cm:

El primer paso es determinar la cantidad de agua de mezclado de acuerdo al tamaño máximo del agregado y al revenimiento requerido, en este caso el T.M.A. es de 3/8” o 9.5 mm y el revenimiento que se requiere se encuentra entre 2.5 a 5 cm, por lo tanto en la *tabla 4.4* se tiene que el agua necesaria es de **207 Kg/m³**.

El segundo paso es determinar la relación agua/cemento para lograr una resistencia de 420Kg/cm², para ello se hace uso de la *tabla 4.5*, en este caso supondremos que el concreto que se fabricara no contiene aire incluido, por lo que obtenemos un coeficiente de 0.41.

Como tercer paso, una vez que sabemos la relación agua/cemento y la cantidad de agua de mezclado requerida, podremos determinar la cantidad de cemento (en masa), necesario para poder realizar la mezcla, por lo tanto:

Agua/Cemento = 0.41; despejando Cemento de la ecuación tenemos que:

$$\text{Cemento} = \text{Agua}/0.41; \text{Cemento} = 207 \text{ Kg/m}^3 / 0.41 = 504.9 \approx \mathbf{505 \text{ Kg/m}^3}$$

En el cuarto paso, ya que tenemos la cantidad de cemento necesario para el diseño, procedemos a calcular la cantidad de agregado grueso necesario, para ello se requiere saber el T.M.A. que es de 3/8” (9.5 mm) y el módulo de finura del agregado fino el cual es de 2.2; como el módulo de finura no se encuentra en la *tabla 4.5*, extrapolamos la serie de valores mostrados y así tenemos que para un MF =2.2 encontramos un volumen unitario de agregado grueso de 0.52.

Con el volumen unitario del agregado grueso, se puede calcular en masa la cantidad de agregado que se requiere para la mezcla, lo anterior se logra multiplicando el volumen unitario encontrado en la *tabla 4.5* por el peso volumétrico del agregado grueso que en este caso es de 1177.71 Kg/m³, por lo tanto se tiene que:

$$\text{Grava} = 1177.71 \text{ Kg/m}^3 (0.52) = 612.4 \approx \mathbf{612 \text{ Kg/m}^3}$$

En el quinto paso calculamos la cantidad de agregado fino por volumen absoluto; primeramente obtenemos los volúmenes unitarios del agua, cemento y grava dividiendo la masa calculada en cada caso, entre su correspondiente masa específica, siendo así que:

Agua	207 / 1000 =	0.207
Cemento	505 / 3150 =	0.160
Grava	612 / 2260 =	0.271
	Suma =	0.638

Una vez que tenemos el volumen unitario total de los materiales, el volumen unitario del agregado fino resulta ser = 1 m³ - 0.638 m³ = 0.362; y el volumen absoluto de la arena será 0.362 (2140 Kg/m³) = 774.7 ≈ **775 Kg/m³**



En el sexto paso, una vez que se tienen las cantidades correspondientes de los materiales para la mezcla, se procede a realizar la corrección por absorción de los agregados como se muestra a continuación:

$$\text{Grava} = \text{Humedad} - \text{Absorción} = 1.5 - 7.76 = -6.26$$

$$\text{Arena} = \text{Humedad} - \text{Absorción} = 1 - 12.36 = -11.36$$

Como se puede apreciar en los cálculos anteriores, al final obtenemos números negativos, lo anterior quiere decir que la humedad que presentan los agregados momentos antes de realizar la mezcla es mucho menor que la absorción de estos y por ello para realizar la corrección de agua se debe respetar el signo negativo para que al final de los cálculos podamos encontrar la cantidad de agua suficiente que cubra la necesidad de absorción de los agregados.

La corrección de agua en la mezcla se obtiene mediante la siguiente formula:

Peso del agua - (peso de la grava x corr. abs. de grava /100) - (peso de la arena x corr. abs. de arena /100)

$$207 - [612(-6.26) /100] - [775(-11.36) /100] = 207+38.3+88 = 333.3 \approx \mathbf{333 \text{ Kg/m}^3}$$

Analizando el resultado anterior, nos podremos dar cuenta que en realidad hay necesidad de aumentar la cantidad de agua y no lo contrario, como comúnmente sucede con agregados vírgenes provenientes de las minas.

En resumen, para lograr una resistencia de 420 Kg/m³ se requieren de las siguientes cantidades de material:

- Agua = 33 Kg/m³
- Cemento = 505 Kg/m³
- Grava = 612 Kg/m³
- Arena = 775 Kg/m³



CAPÍTULO V.-

FABRICACIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO, UTILIZANDO AGREGADOS RECICLADOS COMO MATERIA PRIMA

5.1.- Diseño y construcción de las adoquineras manuales.

Para poder fabricar los adoquines necesarios que más adelante serán evaluados mecánicamente, se requiere saber en primera instancia las características geométricas y de diseño que deben cumplir, para ello nos referiremos a la norma NMX-C-314-ONNCCE-2014 “Adoquines para uso en pavimento, especificaciones y métodos de ensayo”, en donde se establecen cuatro tipos de adoquines con las características que se mencionan a continuación:

Tabla. 5.1.- Clasificación de los adoquines.

Tipo	Espesor mínimo nominal (mm)	Uso
A	60	Tránsito peatonal
B	60	Tránsito ligero
C	80	Tránsito medio
D	80	Tránsito pesado

Tabla. 5.2.- Resistencia a compresión de los adoquines.

Tipo	Resistencia media Mpa (Kg/cm ²)	Resistencia mínima individual Mpa (Kg/cm ²)
A	29.4 (300)	24.5 (250)
B	39.2 (400)	35.3 (360)
C	44.1 (450)	39.7 (405)
D	55.0 (560)	50.0 (510)

Adicionalmente se establece que la relación largo-ancho debe estar entre 1 y 2, y la relación largo-espesor no debe ser menor de 2 ni mayor de 5.

De acuerdo a lo anteriormente mencionado se propone fabricar adoquines de dos formas geométricas diferentes con espesores de 6cm y 8cm; además, como se estableció anteriormente en el Capítulo 4 “Diseño de mezclas”, se fabricaran adoquines de Tipo A, B y C, por consiguiente las formas geométricas propuestas son como a continuación se describen:

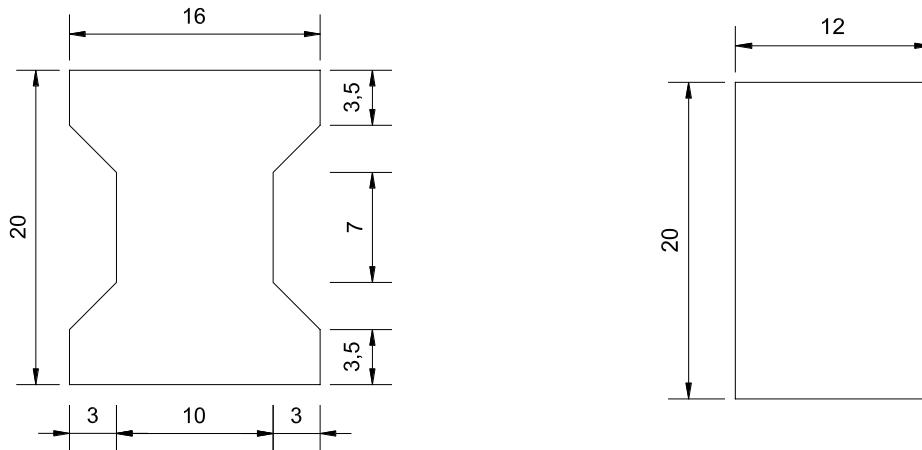


Fig. 5.1.- La geometría propuesta cumple con las relaciones establecidas por la norma (acotaciones en cm).

Como es sabido los adoquines se fabrican mediante un proceso de vibro-compresión, desafortunadamente para el desarrollo de la presente investigación, no se cuenta con una máquina que pueda llevar a cabo dicho proceso, debido a lo anterior se optó por fabricar dos adoquineras manuales en las que de forma rústica se elaboran los adoquines a partir del llenado de los moldes con concreto para posteriormente ser apisonados en forma manual por unas placas con la misma forma geométrica de los moldes.

A continuación se muestra en forma ilustrativa, el proceso constructivo de las adoquineras manuales:



Fig. 5.2.- Cortado y doblado de las piezas, se utilizó lámina de acero inoxidable.



Fig. 5.3.- Presentación de las piezas intermedias del molde para verificar medidas antes de aplicar soldadura.



Fig. 5.4.- Presentación de las piezas que conforman el molde antes de aplicar soldadura de arco eléctrico.



Fig. 5.5.- Presentación de los marcos que soportaran las placas.



Fig. 5.6.- Medición y corte de las extensiones que servirán para ajustar el espesor entre 6cm y 8cm de los adoquines.



Fig. 5.7.- Trazo de las figuras geométricas en placa de hierro de 1.2mm de espesor, que servirá para apisonar el concreto.



Fig. 5.8.- Colocación de las extensiones que servirán para ajustar el espesor de los adoquines con sus respectivas placas.



Fig. 5.9.- Adoquineras ya ensambladas.

Finalmente en el molde de figura de hueso o de “I” se podrán fabricar tres adoquines por cada llenado y en el molde cuya figura es rectangular se podrán fabricar cuatro adoquines por cada llenado (fig. 5.10).



Fig. 5.10.- Con las adoquineras terminadas en su totalidad se puede apreciar con mayor claridad el funcionamiento de las mismas.

5.2.- Fabricación de los adoquines

Durante el diseño y la elaboración de concreto se procuró tener revenimientos bajos con la finalidad de poder lograr la estabilidad de las piezas al momento de retirar los moldes.

Antes de utilizar las adoquineras, se verifico su funcionalidad mediante el llenando de los moldes con arena, se observó un funcionamiento eficiente, puesto que las piezas fabricadas se mostraron geométricamente aceptables. Para igualar las condiciones de fabricación de los adoquines, se propuso apisonar 15 veces la mezcla contenida en los moldes después de haberlos llenado. En los siguientes apartados se describen e ilustran las características que presentaron las mezclas de concreto y los adoquines ya terminados; por otra parte hay que recordar la nomenclatura designada en el Capítulo 4 para diferenciar los adoquines que contienen caucho de los que no lo contienen: CAR (Concreto con agregados reciclados) y CARyC (Concreto con agregados reciclados y caucho).

5.2.1.- Adoquines CAR-1

Se utilizó arena y grava reciclada tal cual se obtuvo de la planta trituradora; durante el mezclado de los materiales se observaron las siguientes características:

- Fue necesario adicionar 2 litros de agua, pues los materiales no se homogenizaron debidamente y se presentaban grumos de material seco.
- Se observó una considerable cantidad de desperdicio, pues la mezcla se quedaba pegada en la revolvedora y el desprenderla para utilizarla implicaba pérdida de tiempo.
- Se obtuvo un revenimiento de 2.5 cm lo cual fue ideal al momento de desmoldar los adoquines (fig.5.11).

- La colocación del concreto fue muy complicado, debido a que la mezcla presentaba un fraguado rápido, ocasionando con ello que la compactación fuese más difícil conforme transcurría el tiempo.



Fig. 5.11.- Verificación del revenimiento de la mezcla.



Fig. 5.12.- Apariencia de las piezas terminadas.



Fig. 5.13.- Día posterior a la fabricación de los adoquines, se verifica la forma de colocación de estos.

5.2.2.- Adoquines CAR-2

Debido a que el alto contenido de material fino de la arena reciclada, influye negativamente en el mezclado, se opta por utilizar arena de mina para la fabricación de los siguientes adoquines. Durante el mezclado se observaron las siguientes características:

- La mezcla presentaba una mejor fluidez.
- La cantidad de desperdicio fue menor en comparación con la mezcla anterior.
- Se obtuvo un revenimiento de 4.5 cm (fig.5.15).
- Al principio el fraguado era lento pero pasados 10 minutos aproximadamente, el fraguado empezaba a acelerarse lo que ocasionaba que el llenado y compactado de los moldes se fuera complicando.



Fig. 5.14.- Preparación de los materiales antes de ser mezclados.



Fig. 5.15.- Verificación del revenimiento de la mezcla.



Fig. 5.16.- Apariencia de los adoquines después de ser desmoldados.

5.2.3.- Adoquines CAR-3

Las características de la mezcla fueron similares a la del diseño anterior, solo que para esta, el revenimiento fue aún mayor siendo este de 7.5 cm (fig.5.17).



Fig. 5.17.- Verificación del revenimiento de la mezcla.



Fig. 5.18.- Apariencia de los adoquines después de haber sido desmoldados.



Fig. 5.19.- Preparado de los adoquines para poderlas introducir al cuarto de curado.

5.2.4.- Adoquines CAR-4

Posteriormente al mezclado de los materiales las características que presentó la mezcla son las siguientes:

- Se observó que presentaba una mejor fluidez.
- La cantidad de desperdicio fue mínima.
- Se obtuvo un revenimiento de 14.5 cm (fig.5.20).
- Debido a que la mezcla presentaba un revenimiento muy alto, se presentaron dificultades en el desmoldado de los adoquines; al principio el fraguado era lento lo que contribuía en tiempo para llevar a cabo las actividades a más detalle pero pasados los 15 minutos se observó que el fraguado aceleró demasiado.



Fig. 5.20.- Verificación del revenimiento de la mezcla.



Fig. 5.21.- Apariencia de los adoquines después de haber sido desmoldados.



Fig. 5.22.- Elaboración de los especímenes cúbicos.

Ya fraguado el concreto, se observó una deficiente uniformidad en el acabado de los adoquines (fig. 5.21 y 5.23), esto debido a que el concreto durante el apisonamiento del material, la lechada o pasta formaba irregularidades en la superficie de las piezas.



Fig. 5.23.- Se observa que al momento de desmoldar los adoquines, las piezas tienden a deformarse debido al alto revenimiento de la mezcla, por otra parte los cubos se muestran con una mayor uniformidad en el acabado.

5.3.- Adoquines con caucho.

La esencia de la presente investigación consiste en hacer uso de materiales considerados como desperdicio (en este caso concreto viejo), para poder fabricar un nuevo producto cuyo valor agregado cubra las expectativas del consumidor; por tal motivo durante la fabricación de las primeras mezclas de concreto, surgió la propuesta de hacer uso del caucho en su forma granular (3-5 mm) y en polvo (fig. 5.24) para fabricar adoquines en los cuales posteriormente se evaluara su desempeño mecánico ante las pruebas requeridas por normatividad.

El caucho a utilizar proviene de la trituration de neumáticos que son considerados como inservibles o basura debido a que su periodo de vida útil ha finalizado; el objetivo de utilizar este material para la fabricación de los adoquines es conjugar las características de los agregados reciclados con el caucho para así tratar de obtener lo mejor de los dos materiales y lograr como resultado un adoquín con un mejor desempeño.



Fig. 5.24.- Del lado izquierdo se observa el caucho en granulo cuyo tamaño oscila entre 3 y 5mm y del lado izquierdo el caucho en polvo.

A continuación se mencionan las características físicas que presentaron las mezclas adicionadas con caucho y se ilustra la fabricación de los adoquines.

5.3.1.- Adoquines *CARyC-1*

Después de haber mezclado los materiales, el concreto presento un comportamiento totalmente distinto al que mostraron los concretos que no contienen caucho, se pudo apreciar las siguientes características:

- La mezcla presentaba una mayor cohesión, esto es, no se pegaba en las paredes ni aspas de la revolvedora.
- Una buena trabajabilidad.
- La mezcla presentó un comportamiento plástico.

- Presento un revenimiento aceptable de 3 cm (fig. 5.27).
- La facilidad para el llenado de los moldes y la compactación de la mezcla fue mejor que en las mezclas anteriores.



Fig. 5.25.- Dosificación del caucho en polvo.



Fig. 5.26.- Dosificación del caucho en granulo.



Fig. 5.27.- Verificación del revenimiento de la mezcla.



Fig. 5.28.- Apariencia de los adoquines al término de su fabricación.

Después de que los adoquines fueron fabricados, se pudo apreciar algunas deficiencias mínimas en las piezas, tales como oquedades y variaciones de espesor, en cuanto a la uniformidad geométrica de las piezas se consideraron aceptables.



Fig. 5.29.- Preparación de las piezas para ser ingresadas a la cámara de curado.



Fig. 5.30.- Presentación de los adoquines para su posible colocación.

5.3.2.- Adoquines CARyC-2

Las características que presento la mezcla se mencionan a continuación:

- La mezcla no se pegaba en las paredes ni aspas de la revolvedora.
- Una mejor trabajabilidad.
- La mezcla presentó un comportamiento más plástico en comparación con la mezcla anterior.
- Presento un revenimiento de 1.5 cm mucho más bajo que los anteriores lo cual es ideal para el llenado de los moldes (fig. 5.32 y 5.33)
- La facilidad para el llenado de los moldes y la compactación de la mezcla fue mejor que en las mezclas anteriores (fig. 5.34).
- Al momento de desmoldar los adoquines, estos presentaron una mejor apariencia y uniformidad en el acabado (fig. 5.35).



Fig. 5.31.- Vista de los materiales ya dosificados antes de ser mezclados.



Fig. 5.32.- La mezcla presenta un revenimiento ideal para la fabricación de los adoquines.



Fig. 5.33.- Revenimiento de la mezcla es de 1.5cm.



Fig. 5.34.- La apariencia de los adoquines terminados, es mucho mejor que las mezclas anteriores.

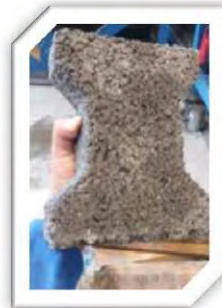


Fig. 5.35.- La uniformidad geométrica de las piezas es mucho mejor que las piezas anteriormente fabricadas.

5.3.3.- Adoquines CARyC-3

Una vez ya mezclado los materiales, el concreto presento las siguientes características, que en general fueron muy similares a las de la mezcla anterior.

- La mezcla no se pegaba en las paredes ni aspas de la revolvedora.
- Una buena trabajabilidad.
- La mezcla presentó un comportamiento plástico.
- Presento un revenimiento de 1 cm, lo cual es ideal para el llenado de los moldes (fig. 5.37).
- La facilidad para el llenado de los moldes y la compactación de la mezcla fue mejor.

- Al momento de desmoldar los adoquines, estos presentaron una mejor apariencia y uniformidad en el acabado (fig. 5.38 y 5.39).
- Una mejor cohesión de los materiales que integran la mezcla.



Fig. 5.36.- Vista de los materiales ya dosificados antes de ser mezclados.



Fig. 5.37.- Revenimiento de la mezcla es de 1 cm.



Fig. 5.38.- La apariencia de los adoquines terminados, es similar a la del diseño anterior.



Fig. 5.39.- Los adoquines presentan una mejor uniformidad geométrica.



Fig. 5.40.- Preparación de las piezas para ser ingresadas a la cámara de curado.

5.3.4.- Adoquines CARyC-4

Las características que se observaron en la mezcla fueron las siguientes:

- La mezcla no se adhería la revolvedora.
- Una buena trabajabilidad.
- La mezcla presentó un comportamiento poco plástico.
- Presento un revenimiento de 4.5cm (fig. 5.42).
- Al momento de desmoldar los adoquines, estos presentaron buena apariencia y uniformidad en el acabado (fig. 5.43).



Fig. 5.41.- Vista de los materiales ya dosificados antes de ser mezclados.



Fig. 5.42.- Revenimiento de la mezcla es de 4.5 cm.



Fig. 5.43.- La apariencia de los adoquines es geoméricamente buena.



Fig. 5.44.- Preparación de las piezas para ser ingresadas a la cámara de curado.



Fig. 5.45.- Después de elaborados los adoquines se ingresan a la cámara de curado para que posteriormente se puedan realizar los ensayos programados.

Otra de las características obtenidas de las mezclas anteriormente hechas es la masa volumétrica del concreto en estado fresco, a manera de resumen en la siguiente tabla se muestran las masas volumétricas de las mezclas elaboradas:

TABLA 5.3.- PESO VOLUMETRICO DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO								
Nomenclatura	No de molde	Resistencia de diseño (Kg/cm ²)	Peso vacío (Kg)	Peso lleno(Kg)	Peso neto (Kg)	volumen molde (m ³)	Peso Volumétrico (kg/m ³)	Promedio
CAR-2	1	420	3.10	6.35	3.25	0.0016	2031.25	2000.00
	2		3.40	6.55	3.15	0.0016	1968.75	
	3		3.50	6.70	3.20	0.0016	2000.00	
CAR-3	1	360	4.70	7.85	3.15	0.0016	1968.75	1979.17
	2		4.85	8.00	3.15	0.0016	1968.75	
	3		3.40	6.60	3.20	0.0016	2000.00	
CAR-4	1	250	4.70	7.85	3.15	0.0016	1968.75	1979.17
	2		4.85	8.00	3.15	0.0016	1968.75	
	3		3.10	6.30	3.20	0.0016	2000.00	
CARyC-2	1	350	4.80	7.35	2.55	0.0016	1593.75	1602.08
	2		3.10	5.66	2.56	0.0016	1600.00	
	3		3.40	5.98	2.58	0.0016	1612.50	
CARyC-3	1	350	3.50	5.90	2.40	0.0016	1500.00	1533.33
	2		4.65	7.18	2.53	0.0016	1581.25	
	3		4.70	7.13	2.43	0.0016	1518.75	
CARyC-4	1	250	4.65	7.50	2.85	0.0016	1781.25	1791.67
	2		4.80	7.65	2.85	0.0016	1781.25	
	3		3.10	6.00	2.90	0.0016	1812.50	

En el caso de la primera mezcla no se logró obtener la masa volumétrica ya que como se mencionó anteriormente, la mezcla presentaba un fraguado rápido por lo que no hubo tiempo de tomar dicha información. Para el caso de la quinta mezcla no se pudo obtener la masa volumétrica debido a que no había moldes disponibles para elaborar las muestras.



La masa volumétrica del concreto normal en estado fresco se encuentra por encima de los 2,200 Kg/m³, en la tabla anterior se puede apreciar que la masa volumétrica del concreto elaborado con agregados reciclados es menor en comparación con el concreto normal, es más notoria la disminución de la masa volumétrica del concreto cuando al diseño de la mezcla se le adiciona caucho.

5.4.- Conclusión capitular

Cabe destacar que para elaborar las distintas mezclas descritas anteriormente, primero se homogenizaron y humedecieron los agregados reciclados antes de agregar el cemento; durante la elaboración de la primera mezcla, se observó que los agregados reciclados son muy absorbentes lo cual al momento de mezclar todos los materiales estos no permitían una hidratación adecuada del cemento ocasionando una mezcla muy seca en donde todavía se podía apreciar grumos de material sin hidratar, además la mezcla se vuelve poco manejable y el tiempo de fraguado es más acelerado.

Por el contrario cuando primero se humedecen los agregados y posteriormente se adiciona el cemento, la hidratación de este último es mejor y la mezcla presenta una mejor fluidez además de que el tiempo de fraguado es más lento.

Se prevé que el uso de una maquina vibro-compresora aumentaría la calidad de fabricación de los adoquines, sin embargo no se descarta que de los adoquines elaborados de forma manual se obtengan buenos resultados.

El revenimiento y el contenido de material fino, juegan un papel importante en el acabado de las piezas, ya que si el revenimiento es alto, la mezcla no podrá sostenerse por sí misma al momento de desmoldar, y si el contenido de finos es mayor, estos buscaran adherirse a las placas que comprimen la mezcla, formándose con ello relieves indeseables.



CAPÍTULO VI.- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS ADOQUINES

6.1.- Resistencia a la compresión

La primera característica mecánica a evaluar de los adoquines es la resistencia a compresión, para ello los ensayos se realizaron en dos grupos, el primero consiste en los adoquines que solo contienen agregados reciclados y el segundo grupo lo conforman los adoquines que contienen agregados reciclados y caucho, esto debido a que el desempeño en ambos casos se prevé sea totalmente distinto.

6.1.1.- Adoquines fabricados con agregados reciclados

Para realizar el ensaye de resistencia a compresión se utilizó una prensa manual con capacidad de 120 ton, en todos los casos se utilizó la misma prensa a fin de evitar variaciones en los resultados y asegurar la confiabilidad de los mismos.

En primer lugar se ensayaron los especímenes cúbicos y posteriormente los adoquines. Los resultados que se obtuvieron al ensayar los primeros adoquines a edades de 7, 14 y 28 días, fueron muy bajos en comparación con la resistencia de diseño, por lo que para los próximos especímenes se propuso que los ensayos fuesen a 14, 42 y 90 días, a excepción del cuarto diseño ya que el primer ensaye a compresión se pospuso hasta el día 35 debido al periodo vacacional establecido en la Facultad de Ingeniería.

Los cubos de concreto presentaron óptimos resultados, siendo que estos logran la resistencia requerida hasta los 90 días de edad después de haber permanecido en la cámara de curado (fig. 6.1 y 6.2).



Fig. 6.1.- Resistencia a compresión en cubos de concreto.

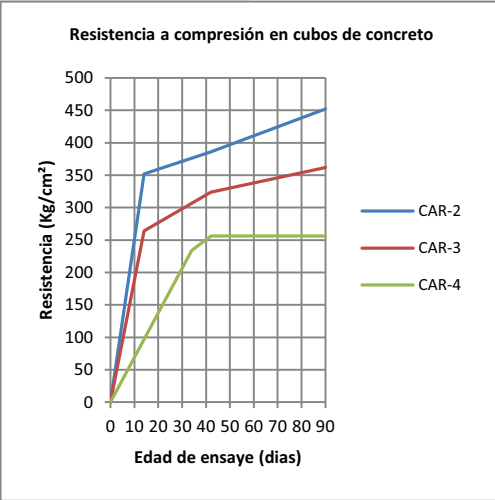
Fig. 6.2.- Distintas fallas que presentaron los cubos después de aplicarles la carga.

A continuación se presentan los resultados obtenidos después de realizar el ensaye de resistencia a compresión en cubos de concreto (tabla 6.1), cabe mencionar que solo en las primeras mezclas (CAR) se elaboraron cubos de 10 x 10 cm, pues no se consideró pertinente elaborar cubos en las mezclas con caucho, debido a que se esperaban bajas resistencias.



Tabla. 6.1.- Resultados de la resistencia a compresión en cubos de concreto.

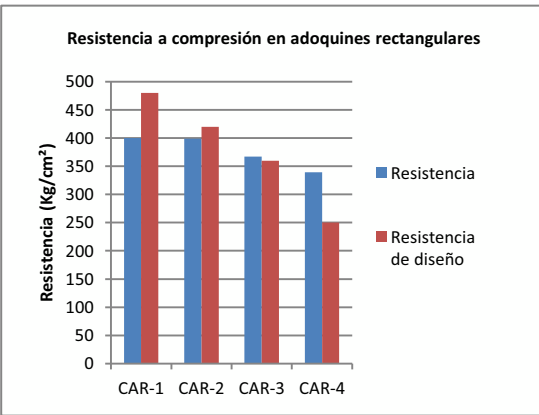
Nomenclatura	Edad	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia de diseño (Kg/cm ²)
CAR-2	14 días	352	420
CAR-2	42 días	386	420
CAR-2	90 días	452	420
CAR-3	14 días	264	360
CAR-3	42 días	324	360
CAR-3	90 días	362	360
CAR-4	35 días	234	250
CAR-4	42 días	256	250
CAR-4	90 días	256	250



Después se obtuvo la resistencia a compresión de los adoquines en forma rectangular (tabla 6.2), para este caso se ensayaron dos adoquines por cada edad especificada, lo anterior con la finalidad de obtener un promedio en cada ensaye y tener mayor certeza en cuanto a los resultados.

Tabla. 6.2.- Resultados de la resistencia a compresión en adoquines rectangulares.

Nomenclatura	Edad	Resistencia (Kg/cm ²)	Promedio	Resistencia de diseño (Kg/cm ²)
CAR-1	90 días	400.15	400.15	480
CAR-2	90 días	429.05	399.17	420
CAR-2	90 días	369.28		
CAR-3	90 días	346.77	367.26	360
CAR-3	90 días	387.75		
CAR-4	90 días	334.44	339.10	250
CAR-4	90 días	343.77		



En caso de los primeros adoquines, solo se pudo ensayar un espécimen por cada edad especificada, esto debido a que la cantidad de adoquines no era la suficiente para llevar a cabo dos ensayes por cada edad, además se tomaron algunas piezas para labrar las probetas que fueron requeridas en la prueba de resistencia a la abrasión.

Los adoquines rectangulares cuya nomenclatura corresponde a CAR-1 y CAR-2 no cumplen con la resistencia requerida por diseño, siendo que estos solo alcanzan una resistencia de 400 Kg/cm² hasta los 90 días de permanecer en la cámara de curado.



Fig. 6.4.- Resistencia a compresión en adoquines rectangulares.

Fig. 6.3.- Obtención de las características geométricas de los adoquines rectangulares.

Por otra parte los adoquines de nomenclatura CAR-3 y CAR-4 si cumplen con la resistencia establecida por diseño. Los adoquines hechos con la tercera mezcla presentan una resistencia promedio de 367 Kg/cm² a los 90 días, sin embargo, los adoquines hechos con la cuarta mezcla presentaron una mejor resistencia a la compresión siendo que a los 35 días ya contaban con una resistencia promedio de 326 Kg/cm² (fig. 6.3 y 6.4).

Por último se obtuvo la resistencia a compresión de los adoquines en forma de “I” o conocidos de otra forma como figura de hueso; al igual que los adoquines rectangulares, se realizaron dos ensayos por cada edad especificada a excepción de la primera mezcla en donde únicamente se realizó un ensayo por cada edad establecida (fig. 6.5 y 6.6).



Fig. 6.5.- Resistencia a compresión de distintos adoquines, figura de hueso.



Fig. 6.6.- Algunas fallas que presentan los adoquines después del ensayo.



Tabla. 6.3.- Resultados de la resistencia a compresión en adoquines forma de I o hueso.

Nomenclatura	Edad	Resistencia (Kg/cm ²)	Promedio	Resistencia a de diseño (Kg/cm ²)
CAR-1	90 días	357.14	357.14	480
CAR-2	90 días	316.50	353.40	420
CAR-2	90 días	390.29		
CAR-3	90 días	341.99	361.38	360
CAR-3	90 días	380.77		
CAR-4	90 días	329.95	310.50	250
CAR-4	90 días	291.05		

En los resultados mostrados anteriormente (tabla 6.3) se puede observar que los adoquines cuya nomenclatura corresponden a CAR-1 y CAR-2 no cumplen con la resistencia requerida, también se puede apreciar que ambos diseños presentan una resistencia muy similar a los 90 días de edad; por otra parte se observa que los adoquines que corresponden a CAR-3 y CAR-4 cumplen con la resistencia de diseño, en el caso de la tercera mezcla esto sucede hasta haber cumplido 90 días de edad, en cambio en el cuarto diseño hasta los 35 días de edad ya contaba con una resistencia promedio por encima de lo requerido (ver resultados en anexo).

Es prudente mencionar que las mezclas elaboradas resultan útiles para fabricar adoquines de Tipo A (tránsito peatonal), Tipo B (tránsito ligero) y bajo ciertas circunstancias de Tipo C (transito ligero) ya que en este último diseño solo se logró alcanzar 400 Kg/cm² con diseños superiores a los 405 Kg/cm² requerido por norma.

6.1.2.- Adoquines fabricados con agregados reciclados y caucho

A continuación se muestran los resultados que se obtuvieron después de ensayar a compresión los adoquines elaborados con agregados reciclados y caucho, cabe aclarar que para este caso se omitió la fabricación de cubos de concreto, pues no se consideró pertinente su fabricación debido a que se suponía una disminución considerable en la resistencia requerida.

Las fechas propuestas para realizar los ensayos fueron a 14, 28, 42 y 90 días, en algunos casos se ensayaron dos adoquines a la misma edad y en otros casos no, esto debido a que no se contaba con los adoquines suficientes ya que para realizar la prueba de resistencia a la abrasión se requirió de labrar muestras, lo que implicaba que en algunas ocasiones hubiera la pérdida de adoquines por cortes mal realizados.

Los adoquines rectangulares, fueron los primeros en someterse a la resistencia a compresión, desafortunadamente las resistencias obtenidas fueron muy bajas en comparación con las resistencias requeridas (tabla 6.4). A continuación se muestran algunas imágenes de los ensayos realizados.



Fig. 6.7.- Aplicación de carga a los adoquines adicionados con caucho.

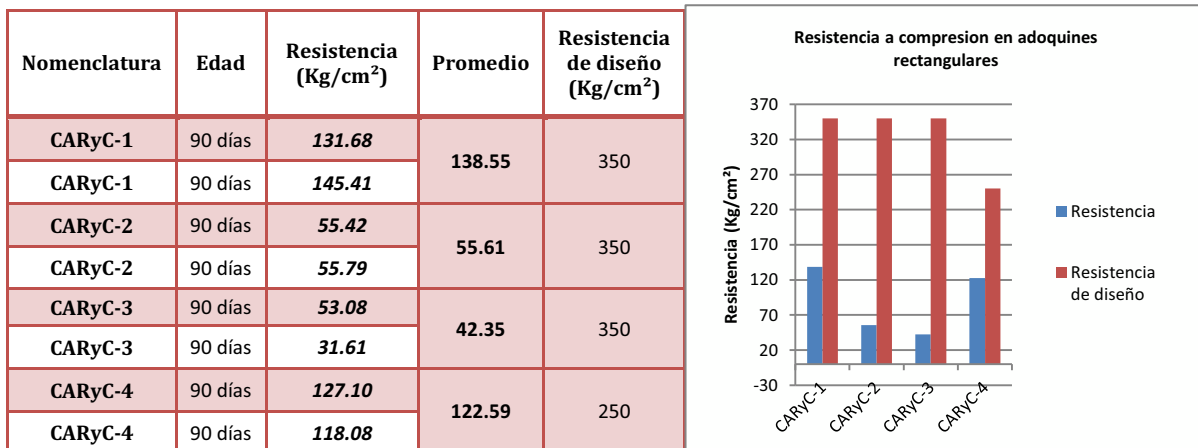


Fig. 6.8.- Dimensionamiento de los adoquines.



Fig. 6.9.- Fallas que presentan los adoquines rectangulares después de haber sido sometidos a compresión.

Tabla. 6.4.- Resultados de la resistencia a compresión en adoquines rectangulares.



Los adoquines con nomenclatura CARyC-1 y CARyC-4 presentan una mayor resistencia en comparación con CARyC-2 y CARyC-3, esto se debe a que el contenido de caucho es menor (12.5%).

Por último se presentan las pruebas realizadas a los adoquines con la figura de “I” o de hueso, desafortunadamente ninguna mezcla cumplió con la resistencia requerida y de igual manera se observa que los adoquines con menor contenido de caucho, son los que presentan un poco más de resistencia en comparación con los que contienen una mayor cantidad de caucho (tabla 6.5). A continuación se muestran algunas imágenes de los ensayos realizados en los adoquines con figura de hueso.



Fig. 6.10.- Dimensionamiento de los adoquines.



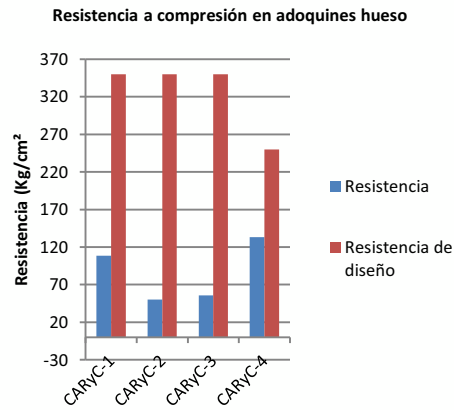
Fig. 6.11.- Compresión de adoquines adicionados con caucho.



Fig. 6.12.- Fallas que presentan los adoquines después de haber sido sometidos a compresión.

Tabla. 6.5.- Resultados de la resistencia a compresión en adoquines forma de I o hueso.

Nomenclatura	Edad	Resistencia (Kg/cm ²)	Promedio	Resistencia de diseño (Kg/cm ²)
CARyC-1	90 días	116.627	108.63	350
CARyC-1	90 días	100.626		
CARyC-2	90 días	47.858	50.09	350
CARyC-2	90 días	52.321		
CARyC-3	90 días	55.826	55.83	350
CARyC-3	90 días	55.826		
CARyC-4	90 días	124.306	133.35	250
CARyC-4	90 días	142.391		



Debido a la adición de caucho en el concreto, durante los ensayos se observó que los adoquines presentaban un comportamiento elástico siendo que absorbían una parte del esfuerzo aplicado sobre ellos.

Algunos adoquines que ya habían sido sujetos a compresión, no presentaron grietas o desprendimientos de material a simple vista; el caucho mejoro en gran medida la cohesión entre los agregados, por esta razón los adoquines y los cilindros no se despedazaban como lo fue en caso de los concretos sin caucho.

6.2.- Resistencia a la abrasión

En la norma NMX-C-314-ONNCCE-2014 “Adoquines para uso en pavimento, especificaciones y métodos de ensayo”, se establece que para realizar la prueba de resistencia a la abrasión, esta se debe hacer mediante la técnica de sandblasting (chorro



de arena), la cual es una técnica abrasiva y consiste en alisar o dar forma a las superficies mediante la aplicación de un chorro de arena expulsada por aire comprimido a través de una boquilla. Esta técnica es ampliamente usada para remover oxido, escama de laminación y cualquier tipo de recubrimiento de superficies preparándolas para la aplicación de un recubrimiento.

Desafortunadamente no se cuenta con un equipo similar para poder llevar acabo la prueba tal y como lo menciona la norma; sin embargo, en el laboratorio de construcción de la Facultad de Ingeniería se encuentra una máquina de desgaste que consiste en un disco metálico giratorio y cuatro tolvas, dos tolvas para suministrar arena y dos para suministrar agua, por lo cual se pueden ensayar dos probetas al mismo tiempo (fig. 6.13), dicha máquina es semejante a la que se menciona en la norma NMX-C-008-1974 “Mosaicos” la cual no se encuentra vigente en la actualidad pero nos proporciona una noción sobre la forma de obtener el desgaste de los adoquines (fig. 6.14).

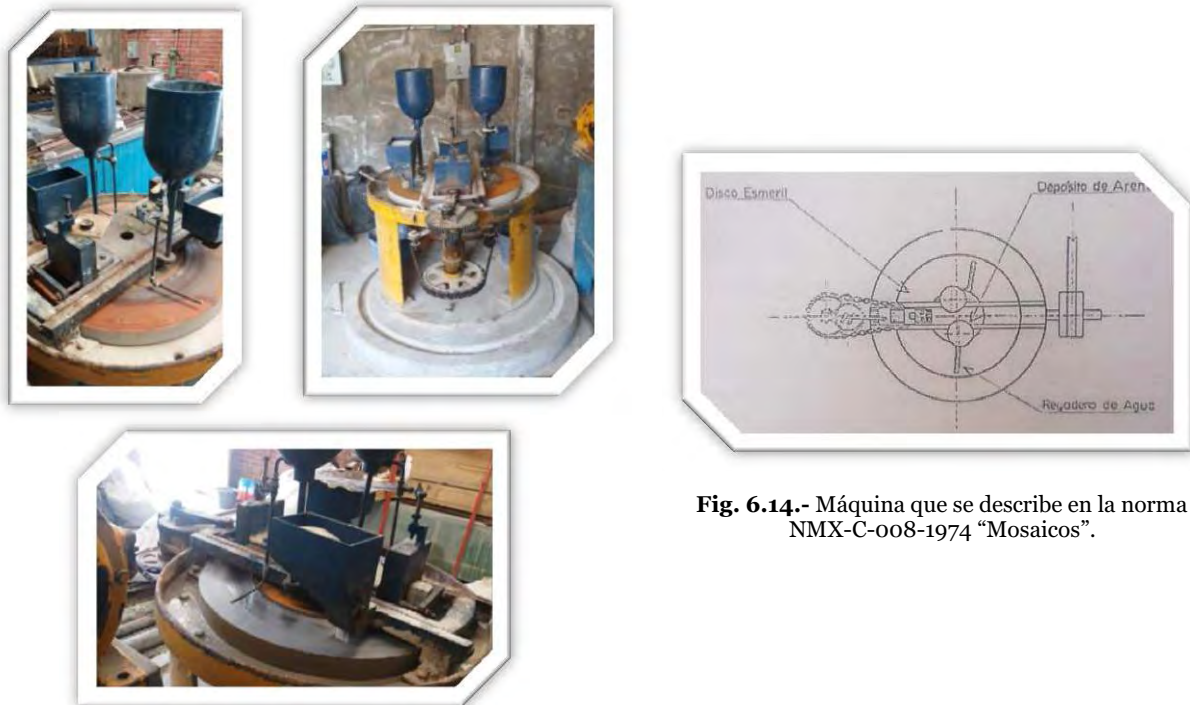


Fig. 6.13.- Diferentes vistas de la máquina con que se cuenta en el laboratorio de construcción de la Facultad de Ingeniería para realizar la prueba de resistencia a la abrasión.

Fig. 6.14.- Máquina que se describe en la norma NMX-C-008-1974 “Mosaicos”.

Por otra parte, durante la investigación documental sobre la resistencia a la abrasión de los adoquines, se encontró la norma Guatemalteca NTG 41087 h2 cuyo objeto es la “Determinación de la resistencia al desgaste por abrasión de adoquines de concreto”, en el cual se utiliza un método similar de desgaste mediante el uso de material abrasivo y disco metálico ancho (fig. 6.15), de igual manera se encontró la norma Europea UNE EN1338 “Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo”; en donde también se obtiene la resistencia a la abrasión mediante un disco metálico y material abrasivo (fig. 6.16), ambas normas hacen referencia a una máquina de desgaste muy similar. A continuación se muestran las máquinas que se mencionan en las normas citadas anteriormente:

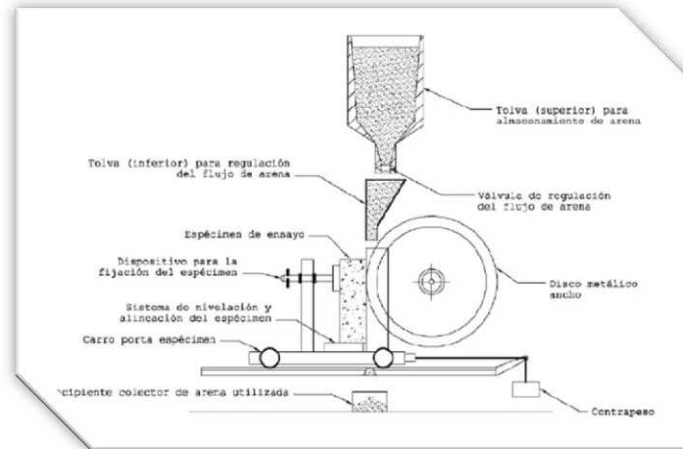


Fig. 6.15.- Máquina de desgaste de acuerdo a la norma guatemalteca NTG 41087 h2.

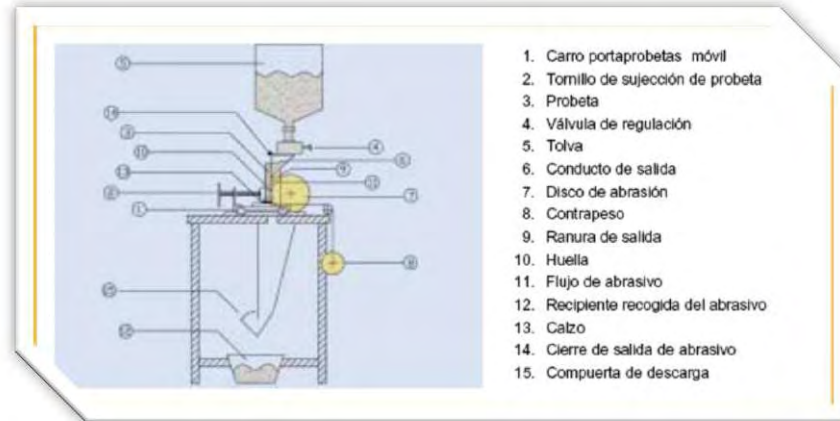


Fig. 6.16.- Máquina de desgaste de acuerdo a la norma europea UNE EN 1338.

Antes de realizar los ensayos con la máquina ubicada en el laboratorio de materiales, fue necesario realizar limpieza de la misma, pues presentaba residuos de arena, tales residuos correspondían a ensayos hechos anteriormente por diversos estudiantes. También se lubricó los mecanismos de engranaje y de porta probetas, y así evitar problemas por falta de lubricación.

Como la norma NMX-C-008-1974 se refiere a mosaicos, las dimensiones establecidas para realizar la prueba de abrasión son incompatibles en comparación con el tamaño de los adoquines, por lo tanto se decidió hacer uso de las dimensiones establecidas en el apartado de prueba de impacto de dicha norma y en donde se establece que el área de la cara sometida al ensayo será de 5cm por 5cm, posteriormente se propuso que la altura del espécimen fuera 10cm para que el espécimen tuviera mejor sujeción en el porta probetas de la máquina.

En cuanto al tiempo que dura el ensaye la norma NMX-C-008-1974 menciona que la muestra o espécimen deberá estar sujeto al desgaste ocasionado por el disco y material abrasivo durante 10 minutos a una velocidad de 70 revoluciones por minuto; en otras palabras la muestra debe estar sometida a 700 revoluciones en 10 minutos.

El disco de la máquina que se utilizó, presenta 85 revoluciones por minuto, y como no cuenta con algún dispositivo que aumente o disminuya las revoluciones del disco, se realizó un simple cálculo para cubrir las 700 revoluciones que se requieren en la norma, siendo así que:

$$700 \text{ rev. / min. } \div 85 \text{ rev. /min. } = 8.24 \text{ min.}$$

Por lo tanto se requieren de 8 minutos y 24 segundos para cubrir las 700 revoluciones que se requieren por norma. En cuanto al material abrasivo, la norma menciona que se debe utilizar arena silícea que pase por la malla No. 50 y que sea retenida por la del No. 80.

6.2.1.- Preparación de las probetas.

Siendo que algunos adoquines presentaron una superficie irregular, se determinó que el ensaye de resistencia a la abrasión no sería confiable puesto que el desgaste no ocurriría de forma uniforme en la superficie de la probeta, por lo anterior se decidió cortar los adoquines a fin de obtener prismas cuyas dimensiones fuesen de 5 cm por 5 cm por 10 cm, para ello se utilizó una cortadora de concreto, al principio los cortes fueron muy irregulares por lo que varios adoquines fueron desechados al no poder lograr obtener unos cortes precisos.

Cortar concreto para obtener probetas prismáticas de buena calidad implica tres aspectos importantes: a) el primero es la seguridad, un descuido durante el corte del concreto puede ocasionar accidentes en los que se vea comprometida la integridad física, b) en segundo la perpendicularidad de los cortes, muchas veces el disco patea la muestra ocasionando que los cortes tengan una inclinación, de igual forma suele suceder que la superficie donde se apoya la pieza a cortar sea irregular ocasionando con ello que sea difícil corregir los cortes inclinados, y c) el tercer aspecto es la uniformidad de los vértices de la probeta, es difícil conseguir que los vértices de una probeta prismática sean uniformes puesto que el disco oscila con la velocidad de giro golpeando con ello los vértices de la muestra ocasionando que se estrellen o se rompan.



Fig. 6.17.- Muestras prismáticas para ser sometidas a la prueba de resistencia a la abrasión.

Si se atienden los aspectos mencionados con anterioridad se puede lograr obtener prismas de excelente calidad con superficies perfectamente alineadas y vértices perfectos (fig. 6.17). Después de varios cortes y muestras desechadas se logró perfeccionar la técnica de corte obteniendo así probetas con medidas más precisas y aristas perfectas.

Debido a que en la máquina se pueden ensayar dos probetas al mismo tiempo se propuso realizar cuatro prismas por cada mezcla así en total se tendrán que ensayar 32 probetas; con los resultados obtenidos se podrá generar un desgaste promedio por cada mezcla ensayada.

Una vez que se han cortado todos los prismas requeridos se procedió a marcar cada una de las caras con tres líneas paralelas a la longitud del prisma así se tendrían 12 líneas en cada probeta, se enumeraron y posteriormente se midieron con un vernier, se anotaron las medidas con precisión milimétrica antes de realizar el ensaye y al final se obtendrá la diferencia en longitud por desgaste. También se registró la masa de cada espécimen así al final de la prueba se registrara la masa final de las probetas con la finalidad de obtener la pérdida en masa debido al desgaste. En las siguientes imágenes se ilustra el procedimiento de marcaje y medición de los prismas.

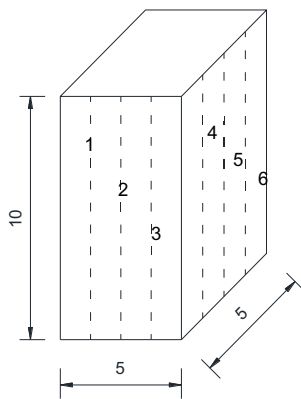


Fig. 6.18.- Descripción gráfica del marcado de los prismas antes de ser sometidos a desgaste (acotación en cm).



Fig. 6.19.- Medición de las líneas marcadas en el prisma con el vernier.

6.2.2.- Desgaste de las probetas.

Posterior al marcado, medición y pesaje de las probetas se procedió a realizar la prueba de desgaste, cabe mencionar que en primer lugar se ensayaron las muestras hechas con agregados reciclados (CAR) y luego se ensayaron las muestras hechas con agregados reciclados y caucho (CARyC) (fig. 6.20 y 6.21).



Fig. 6.20.- En la imagen se puede apreciar el funcionamiento de la máquina durante el ensaye.



Fig. 6.21.- Especimen sujeto al porta probetas de la máquina durante el ensaye.

Después de haber finalizado el ensayo se realizó una comparativa visual sobre el desgaste que presentaron las muestras y luego se procedió a medir con el vernier los especímenes ya ensayados. En las siguientes imágenes se muestra el aspecto que presentaron las probetas después de la prueba.



Fig. 6.22.- Desgaste que presentan las probetas después del ensayo.



Fig. 6.23.- Comparación del desgaste que presentaron diversos especímenes.

Los especímenes que contienen caucho presentaron una mayor resistencia a la abrasión (fig. 6.25), a tal grado que los especímenes que contienen 25% no permitían que el disco metálico pudiera girar, dicho en otras palabras lo frenaban (fig. 6.24), ocasionando con ello un taponamiento en las tolvas de arena, desprendimiento de la banda del motor y que el ensayo no pudiera llevarse a cabo de forma constante, por esta razón se omiten para esta prueba los especímenes cuya nomenclatura corresponden a CARYC-2 y CARYC-3.

Por otra parte los especímenes correspondientes a las nomenclaturas CARYC-1 y CARYC-4 se pudieron ensayar satisfactoriamente debido a que contienen menor cantidad de caucho, sin embargo en el instante en que eran ensayados presentaban la tendencia a frenar el disco, para que esto no sucediera se dejaba ensayar una probeta hasta que el giro del disco fuese constante y posteriormente se dejaba caer lentamente el segundo espécimen.



Fig. 6.24.- Probetas que no pudieron ensayarse adecuadamente debido a que por el contenido de caucho se frenaba el disco metálico de la máquina.



Fig. 6.25.- Las probetas con caucho presentan mayor resistencia a la abrasión en comparación de las probetas que no contienen caucho.



Fig. 6.26.- Posteriormente al ensayo de abrasión se miden las muestras para obtener la diferencia de longitudes por desgaste.



Fig. 6.27.- En la imagen se muestran las probetas ensayadas durante la presente investigación a forma de hacer una comparativa a simple vista entre ellas.

6.2.3.- Resultados

Debido a que la información contenida es demasiada, a continuación se muestra en resumen los resultados obtenidos después de haber realizado el ensaye de resistencia a la abrasión (tabla 6.6 y 6.7).

TABLA 6.6.- DESGASTE EN LONGITUD		
PROBETA	Promedio de desgaste por probeta (cm)	Promedio de desgaste por diseño de mezcla (cm)
CAR-1-A	0.96	1.24
CAR-1-B	1.61	
CAR-1-C	0.99	
CAR-1-D	1.41	
CAR-2-A	1.08	1.42
CAR-2-B	0.92	
CAR-2-C	1.67	
CAR-2-D	2.02	
CAR-3-A	1.50	1.90
CAR-3-B	1.78	
CAR-3-C	1.69	
CAR-3-D	2.63	
CAR-4-A	0.80	1.38
CAR-4-B	1.29	
CAR-4-C	1.55	
CAR-4-D	1.87	
Concreto adicionado con caucho		
CARyC-1-A	0.60	0.42
CARyC-1-B	0.38	
CARyC-1-C	0.21	
CARyC-1-D	0.49	
CARyC-4-A	0.48	0.32
CARyC-4-B	0.20	
CARyC-4-C	0.32	
CARyC-4-D	0.26	

TABLA 6.7.- DESGASTE EN MASA				
PROBETA	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	Diferencia (gr)	Promedio de desgaste por diseño de mezcla (gr)
CAR-1-A	507	458	49	63
CAR-1-B	508	424	84	
CAR-1-C	511	460	51	
CAR-1-D	488	421	67	
CAR-2-A	498	442	56	72
CAR-2-B	502	454	48	
CAR-2-C	503	423	80	
CAR-2-D	515	412	103	
CAR-3-A	498	422	76	86
CAR-3-B	497	432	65	
CAR-3-C	491	406	85	
CAR-3-D	504	385	119	
CAR-4-A	489	448	41	68
CAR-4-B	480	415	65	
CAR-4-C	490	412	78	
CAR-4-D	476	387	89	
Concreto adicionado con caucho				
CARyC-1-A	460	436	24	17
CARyC-1-B	452	438	14	
CARyC-1-C	431	423	8	
CARyC-1-D	460	440	20	
CARyC-4-A	435	409	26	18
CARyC-4-B	454	439	15	
CARyC-4-C	434	419	15	
CARyC-4-D	484	469	15	

Como se puede apreciar en los resultados mostrados, las probetas que contienen caucho presentan una mayor resistencia a la abrasión, mientras en las probetas que solo contienen agregados reciclados presentan una menor resistencia.

Para poder comparar los resultados obtenidos con estándares establecidos, se toma como referencia la norma Guatemalteca NTG 41086, en donde se establece que el desgaste no debe ser mayor a 23 mm; así también se toma como referencia lo establecido en la norma Europea UNE EN1338, en donde se establece que el desgaste no debe ser mayor a 23 mm.

Los resultados obtenidos mediante este ensaye son óptimos, pues se presentó un desgaste máximo en longitud de 19 mm, siendo que se tiene como límite máximo un desgaste de 23 mm, por lo anterior se puede decir que los adoquines se encuentran dentro del parámetro establecido por normas extranjeras.

6.3.- Resistencia a la flexión

Para determinar la resistencia a flexión o módulo de ruptura de los adoquines, se tomó como referencia la norma NMX-C-303-ONNCCE-2010 “Determinación de la resistencia a flexión usando una viga simple con carga en el centro del claro” (fig. 6.29).

Las muestras se obtuvieron a partir de los adoquines, siendo que se cortaron con disco las piezas hasta obtener prismas rectangulares de 20 cm de longitud y de sección cuadrada de 5 cm x 5 cm (fig. 6.28). Para cada tipo de mezcla se realizaron 3 ensayes con la finalidad de obtener una resistencia promedio para cada caso.



Fig. 6.28.- Labrado de muestras para el ensaye de resistencia a flexión.

Durante los ensayos, se pudo apreciar una mayor deformación en las muestras que contienen caucho, sin embargo, la resistencia que presentaron estas fue poca en comparación de las que no contienen caucho.



Fig. 6.29.- Del lado izquierdo se puede apreciar la deformación que presentaron las probetas que contienen caucho, en la imagen del centro e izquierda se observa una probeta que no contiene caucho, la cual no mostro una deformación tan notable como en la primera.

En la norma NMX-C-303-ONNCCE-2010, se establece que para obtener el módulo de ruptura se deberá hacer uso de la siguiente expresión:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \text{ en la cual } R = \text{Módulo de ruptura MPa (Kg/cm}^2\text{)}.$$

P = Carga máxima aplicada en (Kg).

L = Largo del claro en cm.

b = ancho promedio del espécimen, en cm.

d = peralte promedio del espécimen, en cm.

En la siguiente tabla se muestra en resumen de los resultados obtenidos; en el apartado de anexos se encuentran los datos completos que se obtuvieron mediante el ensaye:

Tabla. 6.8.- Resultados del ensaye de resistencia a flexión.

Nomenclatura	Resistencia a flexión MPa(Kg/cm ²)
	Promedio de 3 adoquines
CAR-1 (Tránsito medio)	4.3 (43)
CAR-2 (Tránsito medio)	5.4 (54)
CAR-3 (Tránsito ligero)	4.2 (42.8)
CAR-4 (Tránsito peatonal)	4.5 (45.2)
CONCRETO ADICIONADO CON CAUCHO	
CARyC-1	0.74 (7.4)
CARyC-2	0.47 (4.76)
CARyC-3	0.59 (5.92)
CARyC-4	1.9 (19.52)

La norma NMX-C-314-ONNCCE-2014 solo establece parámetros para la resistencia a compresión de los adoquines, no menciona que parámetros se deben tomar como referencia en caso de la resistencia a flexión, por lo anterior se toma como referencia lo



establecido por la norma Guatemalteca NTG 41086, en la cual se muestra la siguiente tabla:

Clase	Espesores mínimos del adoquín (mm)	Resistencia mínima a flexión del adoquín MPa(Kg/cm ²)	
		Promedio de 3 adoquines	Mínimo de un adoquín individual
A (Uso industria y tránsito pesado)	80	5.4 (55)	4.6 (46.8)
B (Uso en tránsito ligero)	80	4.1 (42)	3.5 (35.7)
C (Uso peatonal)	60	4.1 (42)	3.5 (35.7)

De igual forma se toma como referencia lo establecido en la norma Europea UNE EN1338, la cual menciona que el promedio 3 tres ensayos a flexión no será inferior a 3.6 MPa y que ninguno de los resultados individuales deberá ser inferior a 2.9 MPa, lo anterior sin distinción del tipo de adoquín que se esté manejando.

Si comparamos la resistencia a flexión promedio de 3 adoquines obtenida de los ensayos, con la resistencia a flexión promedio de 3 adoquines establecida por la norma guatemalteca, podremos observar que los adoquines hechos con agregados reciclados cumplen con tal especificación, también se puede apreciar que los adoquines que contienen caucho no cumplen con tales requisitos.

6.4.- Absorción total en 24 horas

La absorción en 24 horas de los adoquines se obtuvo conforme lo indica la norma NMX-C-037-ONNCCE-2005 “Determinación de la absorción de agua y absorción inicial de agua”, ya que la norma NMX-C-314-ONNCCE-2014 “Adoquines para uso en pavimentos especificaciones y métodos de ensayo”, establece que se debe tomar como referencia.

Como no se contaba con los adoquines suficientes parara realizar el ensayo como lo marca la norma, solamente se ensayaron dos adoquines por cada mezcla y al final se obtuvo la absorción promedio.

Para obtener la absorción, los adoquines se introdujeron al horno por un periodo de 24 horas con la finalidad de eliminar la humedad contenida en ellos ya una vez secos se obtuvo la masa de cada uno y se registró, posteriormente se sumergieron en agua por un periodo de 24 horas, pasado este tiempo se sacaron los especímenes del agua y se secaron con una franela para eliminar el agua superficial hasta conseguir que los especímenes se encontraran en un estado s.s.s (saturado superficialmente seco) hecho lo anterior nuevamente se obtuvo la masa de cada adoquín registrándose los resultados.

Los adoquines en estado s.s.s. se ataron a un cordón de plástico y se sumergieron en agua, cuya masa fue registrada con anterioridad, cuando los adoquines se encontraban sin tocar las paredes del recipiente y girando se registró la masa (fig. 6.30).

Con los datos obtenidos se procedió a calcular la absorción de cada espécimen con la siguiente expresión:

$$A = \frac{M_{sss} - M_s}{M_{sss} - P_a} \times 1000$$

En donde:

A = volumen de agua absorbida referido al volumen aparente del espécimen en dm³/m³.

M_s = Masa seca del espécimen en Kg.

M_{sss} = Masa saturada y superficialmente seca en Kg.

P_a = Peso ahogado en Kg.



Fig. 6.30.- Los adoquines se ataron a un cordón de plástico, se verifica que los adoquines no toquen las paredes del recipiente en el cual se encuentran sumergidos y se registra la masa del adoquín en estado s.s.s. sumergido en agua cuya masa es conocida.

En las siguientes tablas se muestra en resumen de los resultados obtenidos, la información completa se encuentra en el apartado de anexos que se encuentra al final de la presente investigación:

Tabla. 6.9.- Absorción total 24hrs en adoquines rectangulares.

Nomenclatura	Absorción individual (%)	Absorción media 2 ensayos (%)
CAR-1	1.87	1.90
	1.94	
CAR-2	2.62	2.66
	2.70	
CAR-3	3.11	3.41
	3.70	
CAR-4	5.66	5.71
	5.77	
Adoquines con caucho		
CARyC-1	2.66	2.44
	2.22	
CARyC-2	2.76	2.70
	2.63	
CARyC-3	3.35	3.53
	3.70	
CARyC-4	2.90	2.49
	2.08	

Tabla. 6.10.- Absorción total 24hrs en adoquines hueso.

No de mezcla	Absorción individual (%)	Absorción media 2 ensayos (%)
CAR-1	1.86	1.49
	1.12	
CAR-2	3.45	3.74
	4.04	
CAR-3	4.13	4.68
	5.23	
CAR-4	4.34	4.78
	5.23	
Adoquines con caucho		
CARyC-1	1.61	1.44
	1.27	
CARyC-2	2.97	2.73
	2.48	
CARyC-3	3.91	3.64
	3.36	
CARyC-4	1.84	1.89
	1.95	



En la norma NMX-C-314-ONNCCE-2014 se establecen los parámetros respecto a la absorción total de agua en 24 hrs que deben cumplir los adoquines de acuerdo al uso que se destinan, por otra parte en la norma guatemalteca NTG 41086 también se establecen parámetros que deben cumplir los adoquines sometidos a este ensaye; en las siguientes tablas se muestran los requisitos mencionados por ambas normas:

Tabla. 6.11.- Requisitos establecidos por la norma mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014.

Tipo	Absorción media, %	Absorción máxima individual, %
A (Tránsito peatonal)	8	11
B (Tránsito ligero)	7	9
C (Tránsito medio)	7	9
D (Tránsito pesado)	5	7

Tabla. 6.12.- Requisitos establecidos por la norma guatemalteca NTG 41086.

Clase	Absorción (en %de masa)	
	Promedio de 3 adoquines	Valor máximo individual
A (uso industrial y tránsito pesado)	≤7	7.7
B (uso en tránsito liviano)	≤9	9.9
C (uso peatonal)	≤9	9.9

Como se puede apreciar, los parámetros establecidos por ambas normas son similares; también se puede apreciar que los resultados que se obtuvieron a través del ensaye son satisfactorios, pues en todos los casos la absorción se encuentra por debajo de 6%.

Adicionalmente a los requisitos establecidos tanto por la norma mexicana como también por la norma guatemalteca, los resultados obtenidos también se compararon con lo que se establece en la norma europea UNE EN1338, en la cual se indica que los adoquines deben cumplir con una absorción total en 24 hrs menor a 6%.

6.5.- Absorción máxima inicial

En la norma de adoquines mexicana, guatemalteca y europea, que se han mencionado con anterioridad no contemplan la absorción máxima inicial, sin embargo, para efectos de la presente investigación se propuso que fuese llevado a cabo dicho ensaye.

Para obtener la absorción máxima inicial de los adoquines se tomó como referencia lo establecido en la norma mexicana NMX-C-037-ONNCCE-2005 “Determinación de la absorción de agua y absorción inicial de agua”

En primer lugar se secaron los adoquines introduciéndolos en el horno por 24 horas a una temperatura de 20°C, una vez que los adoquines se encontraron totalmente secos se anotaron sus dimensiones y se registró la masa de cada uno de ellos (fig. 6.31).

En una charola se vertió agua hasta una altura de 5 mm, posteriormente se introdujeron los adoquines para que estos estuvieran en contacto con el agua, este proceso duro 10 min para cada muestra (fig. 6.31), al término de dicho tiempo se sacaron los adoquines de la charola para posteriormente secar con una franela el agua superficial y nuevamente se registró la masa de los adoquines; cabe mencionar que durante el tiempo en que los adoquines se encuentran en contacto con el agua, el nivel de este debe mantenerse constante en 5 mm.

Con los datos obtenidos se determinó la absorción máxima inicial de los adoquines mediante la siguiente expresión:

$$Cb = \frac{100M}{S\sqrt{t}} = \frac{100(Pi - Po)}{S\sqrt{10}}$$

En donde:

Cb = absorción máxima inicial en g/min.

M = peso del agua en gramos absorbido por el bloque durante el ensayo

S = superficie de la cara sumergida en cm².

t = tiempo de la inmersión en minutos.



Fig. 6.31.- Preparación de los adoquines antes de realizar el ensayo.



Fig. 6.32.- Los adoquines permanecieron en contacto con la película de agua por 10 min para verificar la absorción máxima de cada pieza.



A continuación se muestra en resumen los resultados obtenidos de los ensayos, cabe mencionar que en este caso no existe parámetro alguno de comparación puesto que como se mencionó anteriormente las normas de adoquines que fueron consultadas, no contemplan este tipo de ensayo. El informe completo se muestra en el apartado de anexos.

Tabla. 6.13.- Absorción máxima inicial en adoquines rectangulares.

No de mezcla	Peso Seco (gr)	Área (cm ²)	Espesor (cm)	Cb (g/min)
ADOQUINES HECHOS CON AGREGADOS RECICLADOS				
CAR-1	4156	245.63	8	0.772
CAR-2	3935	246.44	8.2	1.155
CAR-3	2697	244.42	5.8	1.682
CAR-4	2699	246.44	5.4	2.566
ADOQUINES HECHOS CON AGREGADOS RECICLADOS Y CAUCHO				
CARyC-1	2481	249.69	5.8	2.026
CARyC-2	2098	244.00	5.8	3.240
CARyC-3	2011	244.00	5.9	3.110
CARyC-4	2421	246.44	6	0.128

Tabla. 6.14.- Absorción máxima inicial en adoquines hueso.

No de mezcla	Peso Seco (gr)	Área (cm ²)	Espesor (cm)	Cb (g/min)
ADOQUINES HECHOS CON AGREGADOS RECICLADOS				
CAR-1	4504	254.45	8.3	1.119
CAR-2	4262	254.45	8.2	1.740
CAR-3	3130	252.30	6.3	1.880
CAR-4	3095	252.30	6.0	2.131
ADOQUINES HECHOS CON AGREGADOS RECICLADOS Y CAUCHO				
CARyC-1	2603	256.72	5.8	2.094
CARyC-2	2192	245.32	5.7	2.707
CARyC-3	2449	251.00	6.0	2.646
CARyC-4	2518	253.46	5.8	1.996



6.6.- Resistencia al impacto

Los pavimentos hechos con adoquines, suelen estar sometidos a impactos por caída de objetos, por esta razón es necesario realizar un ensayo que evalúe el comportamiento de un adoquín de concreto frente a esa agresión mecánica que posiblemente se manifieste en forma de fisuras, escamaduras o en caso extremo agrietamiento del adoquín.

Lo que se requiere determinar mediante la prueba de impacto, es la cantidad de energía necesaria para ocasionar que el adoquín presente fisuras, grietas o falla total, mediante el impacto ocasionado por un cuerpo cuya masa es conocida y colocado a una determinada altura.

Durante la investigación documental, no se encontró antecedente alguno con respecto a la prueba de impacto sobre concreto o piezas de mampostería, sin embargo solo existen antecedentes sobre prueba de impacto en mosaicos (NMX-C-008-1974); por lo tanto para deducir la energía transferida por el impacto se recurre a la Física, en base a principios elementales de la Mecánica.

Por lo anterior resulta necesario definir algunos conceptos de gran relevancia para poder llevar a cabo dicho ensayo, tales conceptos se refieren a la energía potencial gravitacional (EPG) y a la energía cinética traslacional (ECT).

Cuando se levanta un cuerpo a una cierta altura (h), se efectúa un trabajo igual al producto de la magnitud de la fuerza aplicada por la altura a la que fue desplazado, este trabajo se convierte en **energía potencial gravitacional**, llamada así pues su origen se debe a la atracción gravitacional ejercida por la Tierra sobre el cuerpo. Así pues, si el cuerpo se deja caer, será capaz de realizar un trabajo del mismo valor sobre cualquier objeto en el que caiga.

La energía potencial gravitacional se determina mediante la siguiente expresión:

$$EPG = mgh \quad \text{donde: EPG} = \text{energía potencial gravitacional (joules)}$$
$$m = \text{masa del cuerpo (Kg)}$$
$$g = \text{aceleración de la gravedad (9.81 m/s}^2\text{)}$$
$$h = \text{altura (m)}$$

Un cuerpo suspendido a cierta altura, al ser soltado transforma su energía potencial gravitacional en **energía cinética traslacional**. Para que un cuerpo en reposo adquiera energía cinética traslacional, es necesario realizar un trabajo sobre él, de tal manera que una fuerza constante al actuar sobre el cuerpo lo desplace aumentando la magnitud de su velocidad, acelerándolo desde el reposo hasta alcanzar cierta velocidad; por lo tanto la energía cinética traslacional de un cuerpo es igual a un medio del producto de su masa por el cuadrado de su magnitud de la velocidad que lleva.

La energía cinética traslacional se determina mediante la siguiente expresión:

$$ECT = \frac{1}{2}mv^2, \text{ o bien } ECT = \frac{mv^2}{2}, \text{ recordando que } v = \sqrt{2gh}$$

Dónde: ECT = energía cinética traslacional (joules)
m = masa del cuerpo (kg)
v = velocidad del cuerpo (m/s)

Para poder someter a los adoquines a una energía cinética traslacional fue utilizado un dispositivo que consiste prácticamente en un tubo galvanizado que funciona como guía de un cuerpo metálico de 9 kg, el cual puede ser elevado a distintas alturas mediante una polea; tal dispositivo es similar al utilizado en el concurso nacional de marcos de concreto (fig. 6.33).

El laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, cuenta con este dispositivo al servicio de los estudiantes y tesis, para realizar distintas pruebas (principalmente en marcos de concreto), y como se mencionó anteriormente, no existen antecedentes con respecto a este ensaye hecho sobre piezas de mampostería, por lo que no se cuentan con parámetros o especificaciones del dispositivo a utilizar para llevar a cabo la prueba de impacto, por lo que se propuso utilizar este mismo para determinar la energía a la cual los adoquines ceden a causa de un impacto.



Fig. 6.33.- Dispositivo para evaluar la energía cinética traslacional sobre los adoquines, el cuerpo que impactara sobre los adoquines (o bala) cuenta con 5 cm de diámetro, una altura de 20 cm y una masa de 9 Kg.

Como no se tiene certeza sobre la cantidad de energía cinética traslacional necesaria para dañar los adoquines, se propuso aplicar dicha energía a distintas alturas con intervalos de 10 cm, dicho en otras palabras, el cuerpo que servirá como bala se dejara caer desde distintas alturas hasta que el impacto ocasionado por la caída de la bala haga fallar al adoquín. Así, las alturas propuestas para llevar a cabo el ensaye son 10, iniciando con una altura de 15 cm y finalizando con una altura de 105 cm.

Cabe mencionar que para tener una mejor certeza sobre los resultados del ensayo, se sometieron a impacto dos especímenes por cada tipo de mezcla y posteriormente se promediaron los resultados obtenidos (fig. 6.34 – 6.37).



Fig. 6.34.- En las imágenes se muestran los distintos comportamientos que mostraron los adoquines frente al impacto de un cuerpo en caída libre, del lado izquierdo se muestran fisuras, en el centro se puede apreciar un agrietamiento y del lado derecho la falla total de un adoquín.



Fig. 6.35.- La cohesión de los agregados en los adoquines con caucho es mejor que en los adoquines sin caucho.

Fig. 6.36.- Los adoquines con caucho pudieron soportar una mayor cantidad de energía cinética traslacional.

Fig. 6.37.- En la imagen se puede apreciar las fallas que presentaron los adoquines después de haber sido sometidos a la prueba de impacto.

Para obtener la cantidad de energía que se aplicó sobre los adoquines, se recurrió a cualquiera de las dos expresiones mostradas anteriormente, así por ejemplo en el caso de los adoquines con nomenclatura CAR-1, estos fallaron a 65 y 55 centímetros respectivamente, por lo tanto tenemos que la **energía potencial gravitacional** generada a esas alturas será:

$$EPG = mgh = 9 \text{ Kg} (9.81 \text{ m/s}^2) (0.65 \text{ m}) = \mathbf{57.38 \text{ Joules}}$$

$$EPG = mgh = 9 \text{ Kg} (9.81 \text{ m/s}^2) (0.55 \text{ m}) = \mathbf{48.55 \text{ Joules}}$$

Pero también tenemos que la **energía cinética traslacional** es:

$$ECT = \frac{1}{2}mv^2, \text{ donde la velocidad la obtenemos d } v = \sqrt{2ghe}$$



Por lo tanto:

$$v = \sqrt{2 \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) (0.65 m)} = 3.5711 \text{ m}^2/s^2, \text{ entonces la energía cinética traslacional será:}$$

$$ECT = \frac{1}{2}mv^2 = 0.5 (9 \text{ kg}) (3.5711 \text{ m}^2/s^2)^2 = \mathbf{57.38 \text{ Joules}}$$

Para el siguiente caso se tiene:

$$v = \sqrt{2 \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) (0.55 m)} = 3.2849 \text{ m}^2/s^2, \text{ entonces la energía cinética traslacional será:}$$

$$ECT = \frac{1}{2}mv^2 = 0.5 (9 \text{ kg}) (3.2849 \text{ m}^2/s^2)^2 = \mathbf{48.55 \text{ Joules}}$$

Analizando los ejemplos anteriormente planteados, nos damos cuenta que la energía potencial gravitacional (EPG) y la energía cinética traslacional (ECT) son lo mismo, por lo que es válido utilizar cualquiera de las dos expresiones descritas para llevar a cabo la prueba de impacto, así pues se observa con claridad que al levantar un objeto a cierta altura, este conserva una energía potencial la cual se convierte en energía cinética al dejar caer dicho objeto a esa altura, tal energía es transferida al cuerpo sobre el cual se produce el impacto.

Durante los ensayos se observó que los adoquines adicionados con caucho presentaron una mejor cohesión entre los agregados que lo componen, consecuentemente la resistencia al impacto fue mayor que los adoquines que no contienen caucho; por otra parte también se observó que el caucho contribuye a la absorción de energía transmitida por el impacto de la bala. Debido a estas características los adoquines con caucho lograron soportar una energía cinética traslacional producida a un metro de altura.

Recordemos que los adoquines cuya nomenclatura corresponden a CARYC- 2 y CARYC- 3, se encuentran adicionados con un 25% de caucho con respecto a la masa de los agregados, mientras que los adoquines de nomenclatura CARYC- 1 y CARYC- 4 solo contienen 12% de caucho.

Cabe resaltar que no existe parámetro alguno para poder determinar si los resultados obtenidos son óptimos o no, actualmente no existe alguna norma que tome en cuenta la prueba de impacto en adoquines o piezas de mampostería, de tal forma que los resultados logrados en la presente investigación, quedan como antecedente o referencia para futuras investigaciones o en su caso simplemente para consulta.

A continuación se muestran los resultados logrados mediante la prueba de impacto en adoquines:



"USO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA LA FABRICACION DE ADOQUINES QUE SE PUEDAN UTILIZAR EN LA PAVIMENTACION DE CALLES, AVENIDAS Y PASOS PEATONALES"



Tabla. 6.15.- Resultados de la prueba de impacto sobre adoquines hechos con agregados reciclados.

NOMENCLATURA	RESISTENCIA DE DISEÑO (Kg/cm ²)	ESPESOR DEL ADOQUÍN (cm)	ENERGIA QUE SE PRODUJO DEBIDO A LA CAIDA LIBRE DE LA BALA A DISTINTAS ALTURAS										ENERGIA PROMEDIO
			0.15 m	0.25 m	0.35 m	0.45 m	0.55 m	0.65 m	0.75 m	0.85 m	0.95 m	1.05 m	
CAR-1	480	8	13.24 J	22.07 J	30.90 J*	39.73 J	48.55 J**	57.38 J					52.97 J
CAR-1			13.24 J	22.07 J	30.90 J	39.73 J**	48.55 J						
CAR-2	420	8	13.24 J	22.07 J	30.90 J	39.73 J*	48.55 J	57.38 J					48.56 J
CAR-2			13.24 J	22.07 J	30.90 J**	39.73 J							
CAR-3	360	6	13.24 J	22.07 J									26.49 J
CAR-3			13.24 J	22.07 J*	30.90 J								
CAR-4	250	6	13.24 J	22.07 J	30.90 J**	39.73 J							35.32 J
CAR-4			13.24 J	22.07 J**	30.90 J								
CONCRETO ADICIONADO CON CAUCHO													
CARyC-1	350	6	13.24 J	22.07 J	30.90 J	39.73 J	48.55 J	57.38 J**	66.22 J				66.22 J
CARyC-1			13.24 J	22.07 J	30.90 J	39.73 J	48.55 J	57.38 J*	66.22 J				
CARyC-2	350	6	13.24 J	22.07 J	30.90 J	39.73 J	48.55 J*	57.38 J	66.22 J	75.05 J	83.88 J**	92.71 J	88.30 J
CARyC-2			13.24 J	22.07 J	30.90 J	39.73 J	48.55 J	57.38 J*	66.22 J	75.05 J**	83.88 J		
CARyC-3	350	6	13.24 J	22.07 J	30.90 J	39.73 J	48.55 J	57.38 J	66.22 J	75.05 J**	83.88 J		88.30 J
CARyC-3			13.24 J	22.07 J	30.90 J	39.73 J	48.55 J	57.38 J	66.22 J*	75.05 J	83.88 J*	92.71 J	
CARyC-4	250	6	13.24 J	22.07 J	30.90 J	39.73 J	48.55 J	57.38 J**	66.22 J				70.64 J
CARyC-4			13.24 J	22.07 J	30.90 J	39.73 J	48.55 J	57.38 J	66.22 J**	75.05 J			

* Energía aplicada que ocasiono fisuras en el adoquín.
 ** Energía aplicada que ocasiono grietas en el adoquín.



6.7.- Conclusión capitular

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante los ensayos realizados, podemos observar que los agregados utilizados resultan ser útiles para la fabricación de adoquines; sin embargo, hay que resaltar que los concretos elaborados con tales agregados reciclados cumplen con la $f'c$ requerida hasta los 90 días después de haberse fabricado.

Se recomienda profundizar la investigación y experimentación para lograr que la $f'c$ de concretos hechos con agregados reciclados sea a edades tempranas; diversos autores realizan ensayos a compresión a 7, 14 y 28 días, si en tales edades el concreto no cumple con la $f'c$ de diseño los resultados se desechan, y consecuentemente se dice que los agregados reciclados no son útiles para la fabricación de concreto, lo cual no es totalmente cierto.

Es de gran importancia señalar que la “experimentación” es base fundamental para encontrar soluciones a problemas planteados y que la persistencia que surge al obtener resultados negativos, nos lleva por nuevos planteamientos que generan nuevos conocimientos.

Los adoquines presentaron un buen desempeño frente a los ensayos realizados, se pudo apreciar que los agregados reciclados resultan ideales para la fabricación de este tipo de elementos; por otra parte, se pudo determinar que el caucho adicionado en el concreto disminuye en gran medida su resistencia a compresión y a flexión, no obstante el caucho mejoro en gran medida la resistencia a la abrasión y al impacto del concreto.

Lo anterior abre una puerta a nuevas posibilidades de crear adoquines bicapa, tal y como lo menciona la norma guatemalteca, en los cuales se cumpla con la $f'c$ requerida y al mismo tiempo se reduzca el desgaste originado por el tránsito.



CAPÍTULO VII.- COSTOS DE PRODUCCIÓN DE LOS ADOQUINES

7.1.- Cálculo del precio por adoquín

El costo real sobre la producción de los adoquines puede variar, la principal variable para que esto suceda radica en el tipo de máquina a utilizar; ya que el rendimiento y consumo que presentan, cambia dependiendo del modelo y del sistema de fabricación (estacionaria o móvil, manual o automatizada), además la antigüedad de la máquina también influye en el costo final del producto.

Para poder calcular el costo por unidad terminada, se tomó como referencia el uso de una adoquinera manual nueva modelo OMAQ 320-M y de una mezcladora tipo horizontal modelo M-300 de la empresa OLINMAQ, ambas con un costo de \$95, 000, la máquina tiene un rendimiento de 480 adoquines por hora siendo que se obtienen 4 piezas por molde.



Fig. 7.1.- Equipo indispensable para la fabricación de adoquines, del lado izquierdo la máquina adoquinera y del lado derecho la mezcladora tipo horizontal

Con la información generada hasta el momento de la presente investigación, resulta conveniente calcular el precio por unidad de los adoquines, para ello utilizaremos los volúmenes mostrados en el Capítulo 4. En el siguiente apartado se calculará el precio para los adoquines de Concreto con Agregados Reciclados (CAR), por otra parte también se calculará el precio de los adoquines de Concreto con Agregados Reciclados y Caucho (CARyC); aunque estos últimos no cumplen con la resistencia requerida por norma, el caucho le atribuye al concreto propiedades como la resistencia a la abrasión y aumento de la elasticidad, por lo que resulta interesante conocer el precio de fabricación de estas piezas, las cuales solo podrían ser utilizadas en pasos peatonales y andadores.



7.2.- Precio por unidad de adoquín CAR-1 (480 Kg/cm²)

MATERIALES					
Descripción	Volumen por diseño (m ³)	Volumen del adoquín (m ³)	Volumen de material requerido (m ³)	Precio Unitario	Importe
Cemento	0.219	0.00192	0.00042048	\$2,600.00	\$1.09
Grava 3/8" (reciclada)	0.261	0.00192	0.00050112	\$63.00	\$0.03
Arena (reciclada)	0.292	0.00192	0.00056064	\$63.00	\$0.04
Agua	0.228	0.00192	0.00043776	\$10.00	\$0.00438
Polvo rojo oxido p/ concreto			0.03	\$30.00	\$0.90000
				Total =	\$2.06
MANO DE OBRA					
Descripción	unidad	Cantidad	Salario Real	Importe	
Oficial	jor	0.00208	\$280.50	\$0.58	
Operario	jor	0.00208	\$250.30	\$0.52	
Peón	jor	0.00208	\$214.16	\$0.45	
Peón	jor	0.00208	\$214.16	\$0.45	
			Total =	\$1.99	
MAQUINARIA Y EQUIPO					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe	
Mezcladora tipo horizontal motor 10hp	Hor	0.01667	\$21.60	\$0.36	
Maquina vibrocompactadora motor 5hp	Hor	0.01667	\$15.25	\$0.25	
Herramienta menor	%	3	\$2.08	\$2.14	
			Total =	\$2.76	
Precio por pieza					\$6.82

7.3.- Precio por unidad de adoquín CAR-2 (420 Kg/cm²)

MATERIALES					
Descripción	Volumen por diseño (m ³)	Volumen del adoquín (m ³)	Volumen de material requerido (m ³)	Precio Unitario	Importe
Cemento	0.160	0.00192	0.0003072	\$2,600.00	\$0.80
Grava 3/8" (reciclada)	0.271	0.00192	0.00052032	\$63.00	\$0.03
Arena (mina)	0.362	0.00192	0.00069504	\$650.00	\$0.45
Agua	0.207	0.00192	0.00039744	\$10.00	\$0.00397
Polvo rojo oxido p/ concreto			0.028	\$30.00	\$0.84000
				Total =	\$2.13
MANO DE OBRA					
Descripción	unidad	Cantidad	Salario Real	Importe	
Oficial	jor	0.00208	\$280.50	\$0.58	
Operario	jor	0.00208	\$250.30	\$0.52	
Peón	jor	0.00208	\$214.16	\$0.45	
Peón	jor	0.00208	\$214.16	\$0.45	
			Total =	\$1.99	
MAQUINARIA Y EQUIPO					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe	
Mezcladora tipo horizontal motor 10hp	Hor	0.01667	\$21.60	\$0.36	
Maquina vibrocompactadora motor 5hp	Hor	0.01667	\$15.25	\$0.25	
Herramienta menor	%	3	\$2.08	\$2.14	
			Total =	\$2.76	
Precio por pieza					\$6.88



7.4.- Precio por unidad de adoquín CAR-3 (360 Kg/cm²)

MATERIALES					
Descripción	Volumen por diseño (m ³)	Volumen del adoquín (m ³)	Volumen de material requerido (m ³)	Precio Unitario	Importe
Cemento	0.140	0.00144	0.0002016	\$2,600.00	\$0.52
Grava 3/8" (reciclada)	0.271	0.00144	0.00039024	\$63.00	\$0.02
Arena (mina)	0.382	0.00144	0.00055008	\$650.00	\$0.36
Agua	0.207	0.00144	0.00029808	\$10.00	\$0.00298
Polvo rojo oxido p/ concreto			0.025	\$30.00	\$0.75000
				Total =	\$1.66
MANO DE OBRA					
Descripción	unidad	Cantidad	Salario Real	Importe	
Oficial	jor	0.00208	\$280.50	\$0.58	
Operario	jor	0.00208	\$250.30	\$0.52	
Peón	jor	0.00208	\$214.16	\$0.45	
Peón	jor	0.00208	\$214.16	\$0.45	
			Total =	\$1.99	
MAQUINARIA Y EQUIPO					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe	
Mezcladora tipo horizontal motor 10hp	Hor	0.01667	\$21.60	\$0.36	
Maquina vibrocompactadora motor 5hp	Hor	0.01667	\$15.25	\$0.25	
Herramienta menor	%	3	\$2.08	\$2.14	
			Total =	\$2.76	
Precio por pieza					\$6.41

7.5.- Precio por unidad de adoquín CAR-4 (250 Kg/cm²)

MATERIALES					
Descripción	Volumen por diseño (m ³)	Volumen del adoquín (m ³)	Volumen de material requerido (m ³)	Precio Unitario	Importe
Cemento	0.106	0.00144	0.00015264	\$2,600.00	\$0.40
Grava 3/8" (reciclada)	0.271	0.00144	0.00039024	\$63.00	\$0.02
Arena (mina)	0.416	0.00144	0.00059904	\$650.00	\$0.39
Agua	0.207	0.00144	0.00029808	\$10.00	\$0.00298
Polvo rojo oxido p/ concreto			0.02	\$30.00	\$0.60000
				Total =	\$1.41
MANO DE OBRA					
Descripción	unidad	Cantidad	Salario Real	Importe	
Oficial	jor	0.00208	\$280.50	\$0.58	
Operario	jor	0.00208	\$250.30	\$0.52	
Peón	jor	0.00208	\$214.16	\$0.45	
Peón	jor	0.00208	\$214.16	\$0.45	
			Total =	\$1.99	
MAQUINARIA Y EQUIPO					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe	
Mezcladora tipo horizontal motor 10hp	Hor	0.01667	\$21.60	\$0.36	
Maquina vibrocompactadora motor 5hp	Hor	0.01667	\$15.25	\$0.25	
Herramienta menor	%	3	\$2.08	\$2.14	
			Total =	\$2.76	
Precio por pieza					\$6.17



7.6.- Precio por unidad de adoquín CARyC-3 (350 Kg/cm²)

MATERIALES					
Descripción	Volumen por diseño (m ³)	Volumen del adoquín (m ³)	Volumen de material requerido (m ³)	Precio Unitario	Importe
Cemento	0.151	0.00144	0.00021744	\$2,600.00	\$0.57
Grava 3/8" (reciclada)	0.150	0.00144	0.000216	\$63.00	\$0.01
Arena (mina)	0.316	0.00144	0.00045504	\$650.00	\$0.30
Agua	0.228	0.00144	0.00032832	\$10.00	\$0.00328
Polvo rojo oxido p/ concreto			0.025	\$30.00	\$0.75000
Caucho en granulo			0.30	\$10.00	\$3.00000
Caucho en polvo			0.60	\$10.00	\$6.00000
			Total =		\$10.63
MANO DE OBRA					
Descripción	unidad	Cantidad	Salario Real	Importe	
Oficial	jor	0.00208	\$280.50	\$0.58	
Operario	jor	0.00208	\$250.30	\$0.52	
Peón	jor	0.00208	\$214.16	\$0.45	
Peón	jor	0.00208	\$214.16	\$0.45	
			Total =	\$1.99	
MAQUINARIA Y EQUIPO					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe	
Mezcladora tipo horizontal motor 10hp	Hor	0.01667	\$21.60	\$0.36	
Maquina vibrocompactadora motor 5hp	Hor	0.01667	\$15.25	\$0.25	
Herramienta menor	%	3	\$2.08	\$2.14	
			Total =	\$2.76	
Precio por pieza					\$15.38

7.7.- Precio por unidad de adoquín CARyC-4 (250 Kg/cm²)

MATERIALES					
Descripción	Volumen por diseño (m ³)	Volumen del adoquín (m ³)	Volumen de material requerido (m ³)	Precio Unitario	Importe
Cemento	0.106	0.00144	0.00015264	\$2,600.00	\$0.40
Grava 3/8" (reciclada)	0.239	0.00144	0.00034416	\$63.00	\$0.02
Arena (mina)	0.366	0.00144	0.00052704	\$650.00	\$0.34
Agua	0.207	0.00144	0.00029808	\$10.00	\$0.00298
Polvo rojo oxido p/ concreto			0.02	\$30.00	\$0.60000
Caucho en granulo			0.1	\$10.00	\$1.00000
Caucho en polvo			0.2	\$10.00	\$2.00000
			Total =		\$4.36
MANO DE OBRA					
Descripción	unidad	Cantidad	Salario Real	Importe	
Oficial	jor	0.00208	\$280.50	\$0.58	
Operario	jor	0.00208	\$250.30	\$0.52	
Peón	jor	0.00208	\$214.16	\$0.45	
Peón	jor	0.00208	\$214.16	\$0.45	
			Total =	\$1.99	
MAQUINARIA Y EQUIPO					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe	
Mezcladora tipo horizontal motor 10hp	Hor	0.01667	\$21.60	\$0.36	
Maquina vibrocompactadora motor 5hp	Hor	0.01667	\$15.25	\$0.25	
Herramienta menor	%	3	\$2.08	\$2.14	
			Total =	\$2.76	
Precio por pieza					\$9.12



CAPÍTULO VIII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



Como se pudo observar en el desarrollo de la presente investigación, México se encuentra en un rezago respecto al tema de reciclaje de RCD; aun no existe la conciencia suficiente por cambiar dicha situación. La empresa Concretos Reciclados S.A. de C.V., es pionera del reciclaje en nuestro país, sin embargo falta mucho por realizar, tanto en el ámbito teórico, experimental y principalmente normativo. Nuestro país es privilegiado, pues cuenta con gran abundancia de recursos naturales, debido a esto, la sociedad aún no se ha visto afectada por problemas de escasez en los recursos y consecuentemente existe una gran falta de interés por fomentar la cultura del reciclaje.

Para hacer posible la gestión de los Residuos de la Construcción y Demolición en México, es necesario implicar a todos los participantes que intervienen en el ciclo de vida de estos materiales (productores, generadores, gestores y organismos públicos) que permitan el cumplimiento de los objetivos medioambientales de la legislación vigente, para gestionar correctamente los residuos que se producen, orientar los residuos desde el origen hacia los procesos de reciclado y fomentar el consumo de agregados reciclados como alternativa en obras de construcción, donde la clave fundamental que los RCD tienen para la reinserción en el ciclo de vida para la construcción, es mediante un adecuado proceso de transformación (de residuo - agregado).

Es indispensable tomar como referencia las investigaciones y sobre todo la experiencia que han desarrollado otros países en cuanto al reusó del RCD; algunos países europeos se han visto envueltos en grandes catástrofes a través de su historia y por ello han evolucionado en su forma de gestionar los recursos que poseen, entendiendo así que la materia considerada como desperdicio no pierde totalmente su valor, ya que a través del reciclaje la materia puede recuperar dicho valor e inclusive se puede volver a incorporar en una cadena de producción dando origen a nuevos productos. Japón es un caso excepcional, pues gracias al control total de calidad y su filosofía de “Kaizen”, se ha mantenido como una nación vanguardista en la que el reciclaje de los RCD que generan es casi total.

En la parte experimental de la presente investigación, se pudo observar algunos aspectos importantes que se deben considerar para la fabricación de agregados (en planta), a partir del concreto triturado; a continuación se mencionan algunos:

- Se debe mejorar la cadena de producción de los agregados; por ejemplo, tener un estricto control sobre la recepción de residuos, adicionar procesos de tratamiento como separación de materia orgánica, separación de metales, cribado y control de partículas finas.
- Debido a los costos que implica el realizar lo comentado en el punto anterior, es importante realizar en primera instancia un análisis financiero para poder determinar el costo-beneficio sobre la inversión efectuada o por efectuar, con ello se tendrá mayor certeza sobre la factibilidad de la producción e inserción de los agregados producidos en la industria de la construcción.
- Se debe cuidar la forma en que se tritura la materia prima, pues el tamaño y forma de los agregados producidos juega un papel muy importante durante la fabricación de concreto, de ello depende la fluidez, trabajabilidad y resistencia del concreto. La granulometría obtenida debe de cumplir con lo especificado por la normatividad vigente, pues solo así se podrá lograr obtener concretos de buena calidad.



- Se debe dar prioridad a la “calidad de agregados producidos a partir de los RCD”, ya que de ello depende la aceptación o rechazo por parte de todos aquellos involucrados en la industria de la construcción.

Los agregados producidos a partir de la trituración de concreto viejo, son muy peculiares, requieren de un mayor cuidado al momento de realizar mezclas, pues como se observó en el Capítulo 5, la absorción que presentan, influye demasiado en el comportamiento de la mezcla, lo mismo sucede con el alto contenido de material fino que estos poseen.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la presente investigación, es prudente mencionar que los agregados obtenidos en planta a partir de los Residuos de la Construcción y Demolición, resultan técnicamente factibles para la fabricación de adoquines, y no solo de estos elementos sino también de una amplia gama de productos en los cuales no se requiera de una alta resistencia o de un alto desempeño, lo anterior contribuirá a disminuir la explotación de agregados naturales prolongando por un mayor tiempo la vida útil de los bancos de material.

Se pueden utilizar agregados reciclados en la fabricación de adoquines para tránsito peatonal y tránsito ligero sin que esto represente problema alguno, también se puede fabricar adoquines para tránsito medio, pero bajo ciertas consideraciones, pues como se vio en el Capítulo 6 solo se logró alcanzar una resistencia de 400Kg/cm² en tanto la norma mexicana nos pide una resistencia mínima de 405 Kg/cm².

Trabajar con agregados producidos a partir de la trituración de concreto viejo representa un desafío, el cual se debe tomar como una forma de motivación y persistencia para lograr resultados óptimos, el pesimismo y la apatía que se tiene en nuestra sociedad con respecto al tema, solo forma parte de tantos obstáculos que se tienen que superar en pro de la mejora y desarrollo de nuestra sociedad.



ANEXOS



"USO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES QUE SE PUEDAN UTILIZAR EN LA PAVIMENTACIÓN DE CALLES, AVENIDAS Y PASOS PEATONALES"



TABLA A.1.- RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN ADOQUINES RECTANGULARES

Nomenclatura	Edad	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Área (cm ²)	Peso (Kg)	Carga soportada (Kg)	Peso placa para apoyo (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Promedio	Resistencia de diseño (Kg/cm ²)
CAR-1	14 días	20.5	12.2	7.5	250.10	3.945	69200	12.15	276.74	-----	480
CAR-1	28 días	21.5	12.2	7.5	262.30	3.901	62200	12.15	237.18	-----	480
CAR-1	42 días	21	12	7.7	252.00	4.002	82000	12.15	325.45	-----	480
CAR-1	90 días	20.2	12.2	8.4	246.44	4.478	98600	12.30	400.15		480
CAR-2	14 días	20.1	12.2	5.7	245.22	2.654	71000	12.15	289.59	292.53	420
CAR-2	14 días	20.2	12.3	5.8	248.46	2.639	73400	12.15	295.47		
CAR-2	42 días	20.2	12.2	6.1	246.44	2.841	93200	12.30	378.24	375.80	420
CAR-2	42 días	20.2	12.2	5.9	246.44	2.761	92000	12.30	373.37		
CAR-2	90 días	20.1	12.2	5.7	245.22	2.786	105200	12.15	429.05	399.17	420
CAR-2	90 días	20.1	12.1	5.5	243.21	2.674	89800	12.15	369.28		
CAR-3	14 días	20.2	12.3	8	248.46	3.906	68600	12.30	276.10	260.80	360
CAR-3	14 días	20.1	12.2	8.3	245.22	3.914	60200	12.30	245.49		
CAR-3	42 días	20.2	12.2	8.2	246.44	4.094	69400	12.30	281.66	299.11	360
CAR-3	42 días	20.2	12.2	8	246.44	3.95	78000	12.30	316.56		
CAR-3	90 días	20	12.2	8.4	244.00	4.111	84600	12.15	346.77	367.26	360
CAR-3	90 días	20	12.2	7.9	244.00	3.875	94600	12.15	387.75		
CAR-4	35 días	20.2	12.2	5.7	246.44	2.825	80400	12.30	326.30	326.17	250
CAR-4	35 días	20.3	12.3	5.9	249.69	2.816	81400	12.30	326.05		
CAR-4	42 días	20.3	12.2	6.0	247.66	2.994	77000	12.30	310.96	328.92	250
CAR-4	42 días	20.3	12.3	5.8	249.69	2.881	86600	12.30	346.88		
CAR-4	90 días	20.1	12.2	5.5	245.22	2.790	82000	12.15	334.44	339.10	250
CAR-4	90 días	20.2	12.3	5.5	248.46	2.648	85400	12.15	343.77		

TABLA A.2.- RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN ADOQUINES FIGURA "I"

Nomenclatura	Edad	Espesor (cm)	Área (cm ²)	Peso (Kg)	Carga soportada (Kg)	Peso placa para apoyo (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Promedio	Resistencia de diseño (Kg/cm ²)
CAR-1	14 días	8.5	255.32	4.497	76000	18.50	297.738		480
CAR-1	28 días	8.3	253.30	4.341	75500	12.15	298.114		480
CAR-1	42 días	8.3	253.30	4.220	78400	12.15	309.562		480
CAR-1	90 días	8.2	253.16	4.444	90400	12.30	357.142		480
CAR-2	14 días	8.1	255.56	4.108	63000	12.15	246.565	238.33	420
CAR-2	14 días	8.1	253.00	4.280	58200	12.15	230.088		
CAR-2	42 días	8.2	253.30	4.099	91000	12.30	359.306	336.66	420
CAR-2	42 días	8.4	256.72	4.240	80600	12.30	314.009		
CAR-2	90 días	8.5	255.01	4.484	80700	12.15	316.506	353.40	420
CAR-2	90 días	8.0	252.15	4.351	98400	12.15	390.292		
CAR-3	14 días	6.1	254.40	2.970	78200	12.15	307.438	302.44	360
CAR-3	14 días	6.0	255.56	2.988	76000	12.15	297.434		
CAR-3	42 días	6.0	257.03	3.024	88400	12.30	343.977	342.25	360
CAR-3	42 días	6.2	257.88	3.140	87800	12.30	340.516		
CAR-3	90 días	6.3	255.01	3.283	87200	12.15	341.995	361.38	360
CAR-3	90 días	6.3	252.15	3.202	96000	12.15	380.774		
CAR-4	35 días	6.0	257.03	3.041	69800	12.30	271.611	383.74	250
CAR-4	35 días	6.1	255.56	3.101	75600	12.30	295.869		
CAR-4	42 días	6.3	256.72	3.116	69000	12.30	268.823	278.12	250
CAR-4	42 días	6.0	259.60	3.081	74600	12.30	287.418		
CAR-4	90 días	5.9	254.01	3.180	83800	12.15	329.956	310.50	250
CAR-4	90 días	6.0	257.04	3.166	74800	12.15	291.053		



"USO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES QUE SE PUEDAN UTILIZAR EN LA PAVIMENTACIÓN DE CALLES, AVENIDAS Y PASOS PEATONALES"



TABLA A.3.- RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN ADOQUINES RECTANGULARES

Nomenclatura	Edad	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Área (cm ²)	Peso (Kg)	Carga soportada (Kg)	Peso placa para apoyo (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Promedio	Resistencia de diseño (Kg/cm ²)
CARyC-1	14 días	20.4	12.0	5.5	244.80	2.486	31000	12.15	126.68	-----	350
CARyC-1	28 días	21.0	12.0	6.0	252.00	2.505	28400	12.15	112.75	-----	350
CARyC-1	42 días	20.8	12.0	5.7	249.60	2.424	23200	12.15	93.00	-----	350
CARyC-1	90 días	20.3	12.2	6.0	247.66	2.555	32600	12.30	131.68	138.55	350
CARyC-1	90 días	20.3	12.2	5.8	247.66	2.553	36000	12.30	145.41		
CARyC-2	14 días	20.0	12.0	5.8	240.00	2.135	7200	12.15	30.05	-----	350
CARyC-2	28 días	20.0	12.5	6.3	250.00	2.199	8200	12.15	32.85	-----	350
CARyC-2	42 días	20.0	12.0	6.0	240.00	2.244	12200	12.15	50.88	-----	350
CARyC-2	90 días	20.0	12.1	5.5	242.00	2.039	13400	12.30	55.42	55.61	350
CARyC-2	90 días	20.0	12.2	6.1	244.00	2.308	13600	12.30	55.79		
CARyC-3	14 días	20.0	12.3	5.9	246.00	2.179	6600	12.15	26.88	-----	350
CARyC-3	28 días	20.0	12.2	6.0	244.00	2.103	9800	12.15	40.21	-----	350
CARyC-3	42 días	20.0	12.2	6.0	244.00	2.098	9200	12.15	37.75	-----	350
CARyC-3	90 días	19.8	12.0	5.8	237.60	2.074	12600	12.30	53.08	42.35	350
CARyC-3	90 días	19.9	12.1	5.9	240.79	2.161	7600	12.30	31.61		
CARyC-4	33 días	20.2	12.2	6.1	246.44	2.543	27000	12.30	109.61	110.02	250
CARyC-4	33 días	20.2	12.2	5.5	246.44	2.326	27200	12.30	110.42		
CARyC-4	42 días	20.3	12.2	5.9	247.66	2.483	29200	12.30	117.95	119.37	250
CARyC-4	42 días	20.2	12.3	5.7	248.46	2.316	30000	12.30	120.79		
CARyC-4	90 días	20.0	12.2	5.8	244.00	2.465	31000	12.15	127.10	122.59	250
CARyC-4	90 días	20.0	12.2	6.0	244.00	2.620	28800	12.15	118.08		

TABLA A.4.- RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN ADOQUINES FIGURA "I"

Nomenclatura	Edad	Espesor (cm)	Área (cm ²)	Peso (Kg)	Carga soportada (Kg)	Peso placa para apoyo (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Promedio	Resistencia de diseño (Kg/cm ²)
CARyC-1	14 días	6.0	252.15	2.674	20000	18.50	79.391		350
CARyC-1	28 días	6.0	256.75	2.655	21600	12.15	84.176		350
CARyC-1	42 días	5.8	258.20	2.703	27400	12.15	106.168		350
CARyC-1	90 días	5.5	262.48	2.583	30600	12.30	116.627	108.63	350
CARyC-1	90 días	5.7	262.48	2.651	26400	12.30	100.626		
CARyC-2	14 días	5.8	251.00	2.246	11000	12.15	43.873		350
CARyC-2	28 días	5.8	253.30	2.323	12400	12.15	49.002		350
CARyC-2	42 días	6.0	251.00	2.269	14400	12.15	57.419		350
CARyC-2	90 días	5.8	251.00	2.304	12000	12.30	47.858	50.09	350
CARyC-2	90 días	5.8	248.70	2.167	13000	12.30	52.321		
CARyC-3	14 días	5.7	256.75	2.392	9400	12.15	36.659		350
CARyC-3	28 días	6.0	253.30	2.449	12000	12.15	47.423		350
CARyC-3	42 días	6.0	251.00	2.428	10000	12.15	39.889		350
CARyC-3	90 días	6.0	251.00	2.420	14000	12.30	55.826	55.83	350
CARyC-3	90 días	6.0	251.00	2.486	14000	12.30	55.826		
CARyC-4	33 días	5.9	256.72	2.506	26800	12.30	104.442	109.12	250
CARyC-4	33 días	5.8	256.72	2.501	29200	12.30	113.791		
CARyC-4	42 días	5.8	255.32	2.521	30200	12.30	118.331	120.35	250
CARyC-4	42 días	5.7	256.72	2.549	31400	12.30	122.360		
CARyC-4	90 días	5.8	252.70	2.654	31400	12.15	124.306	133.35	250
CARyC-4	90 días	5.8	255.72	2.701	36400	12.15	142.391		



"USO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES QUE SE PUEDAN UTILIZAR EN LA PAVIMENTACIÓN DE CALLES, AVENIDAS Y PASOS PEATONALES"



TABLA A.5- RESULTADOS DEL ENSAYE DE RESISTENCIA A FLEXIÓN										
Nomenclatura	P (Kg/cm ²)	L (cm)	PxL	3PxL	b (cm)	d ² (cm ²)	bd ²	2bd ²	3PxL / 2bd ²	R
CAR-1	350	10	3500	10500	5	25	125	250	42	43
CAR-1	365	10	3650	10950	5	25	125	250	43.8	
CAR-1	360	10	3600	10800	5	25	125	250	43.2	
CAR-2	460	10	4600	13800	5	25	125	250	55.2	54
CAR-2	450	10	4500	13500	5	25	125	250	54	
CAR-2	440	10	4400	13200	5	25	125	250	52.8	
CAR-3	355	10	3550	10650	5	25	125	250	42.6	42.8
CAR-3	365	10	3650	10950	5	25	125	250	43.8	
CAR-3	350	10	3500	10500	5	25	125	250	42	
CAR-4	350	10	3500	10500	5	25	125	250	42	45.2
CAR-4	400	10	4000	12000	5	25	125	250	48	
CAR-4	380	10	3800	11400	5	25	125	250	45.6	
CONCRETO ADICIONADO CON CAUCHO										
CARyC-1	60	10	600	1800	5	25	125	250	7.2	7.4
CARyC-1	60	10	600	1800	5	25	125	250	7.2	
CARyC-1	65	10	650	1950	5	25	125	250	7.8	
CARyC-2	43	10	430	1290	5	25	125	250	5.16	4.76
CARyC-2	37	10	370	1110	5	25	125	250	4.44	
CARyC-2	39	10	390	1170	5	25	125	250	4.68	
CARyC-3	55	10	550	1650	5	25	125	250	6.6	5.92
CARyC-3	48	10	480	1440	5	25	125	250	5.76	
CARyC-3	45	10	450	1350	5	25	125	250	5.4	
CARyC-4	170	10	1700	5100	5	25	125	250	20.4	19.52
CARyC-4	160	10	1600	4800	5	25	125	250	19.2	
CARyC-4	158	10	1580	4740	5	25	125	250	18.96	

TABLA A.6.- ABSORCIÓN TOTAL 24HRS EN ADOQUINES RECTANGULARES													
Nomenclatura	MS Peso Seco (Kg)	MSSS (Kg)	Peso del agua (Kg)	Peso SSS sumergido (Kg)	Pa Peso Ahogado (Kg)	Msss - Ms	Msss - Pa	Msss - Ms / Msss - Pa	Absorción A = dm ³ /m ³	Absorción A = dm ³ /cm ³	Msss - Ms / MS	Absorción individual (%)	Absorción media (%)
ADOQUINES HECHOS CON AGREGADOS RECICLADOS													
CAR-1	4.123	4.20	9.50	11.55	2.05	0.077	2.15	0.036	35.81	3.58	0.02	1.87	1.90
	4.120	4.20	9.50	11.5	2.00	0.080	2.20	0.036	36.36	3.64	0.02	1.94	
CAR-2	3.898	4.00	9.50	11.50	2.00	0.102	2.00	0.051	51.00	5.10	0.03	2.62	2.66
	3.895	4.00	9.50	11.55	2.05	0.105	1.95	0.054	53.85	5.38	0.03	2.70	
CAR-3	2.667	2.75	9.50	10.85	1.35	0.083	1.40	0.059	59.29	5.93	0.03	3.11	3.41
	2.700	2.80	9.50	10.75	1.25	0.100	1.55	0.065	64.52	6.45	0.04	3.70	
CAR-4	2.650	2.80	9.50	10.90	1.40	0.150	1.40	0.107	107.14	10.71	0.06	5.66	5.71
	2.600	2.75	9.50	10.95	1.45	0.150	1.30	0.115	115.38	11.54	0.06	5.77	
ADOQUINES HECHOS CON AGREGADOS RECICLADOS Y CAUCHO													
CARyC-1	2.484	2.55	10.80	12.20	1.40	0.066	1.15	0.057	57.39	5.74	0.03	2.66	2.44
	2.475	2.53	10.80	12.25	1.45	0.055	1.08	0.051	50.93	5.09	0.02	2.22	
CARyC-2	2.170	2.23	10.80	12.15	1.35	0.060	0.88	0.068	68.18	6.82	0.03	2.76	2.70
	2.095	2.15	10.80	12.10	1.30	0.055	0.85	0.065	64.71	6.47	0.03	2.63	
CARyC-3	2.032	2.10	10.80	12.05	1.25	0.068	0.85	0.080	80.00	8.00	0.03	3.35	3.53
	2.025	2.10	10.80	12.00	1.20	0.075	0.90	0.083	83.33	8.33	0.04	3.70	
CARyC-4	2.410	2.48	9.50	10.85	1.35	0.070	1.13	0.062	61.95	6.19	0.03	2.90	2.49
	2.400	2.45	9.50	10.88	1.38	0.050	1.07	0.047	46.73	4.67	0.02	2.08	



"USO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES QUE SE PUEDAN UTILIZAR EN LA PAVIMENTACIÓN DE CALLES, AVENIDAS Y PASOS PEATONALES"



TABLA A.7.- ABSORCIÓN TOTAL 24 HRS EN ADOQUINES FIGURA "I"													
Nomenclatura	MS Peso Seco (Kg)	MSSS (Kg)	Peso del agua (Kg)	Peso SSS sumergido (Kg)	Pa Peso Ahogado (Kg)	Msss - Ms	Msss - Pa	Msss - Ms / Msss - Pa	Absorción A = dm ³ /m ³	Absorción A = dm ³ /cm ³	Msss - Ms / MS	Absorción (%)	Promedio Absorción (%)
ADOQUINES HECHOS CON AGREGADOS RECICLADOS													
CAR-1	4.467	4.55	9.55	11.75	2.20	0.08	2.35	0.035	35.32	3.53	0.02	1.86	1.49
	4.45	4.50	9.55	11.7	2.15	0.05	2.35	0.021	21.28	2.13	0.01	1.12	
CAR-2	4.205	4.35	9.50	11.65	2.15	0.15	2.20	0.066	65.91	6.59	0.03	3.45	3.74
	4.210	4.38	9.50	11.6	2.10	0.17	2.28	0.075	74.56	7.46	0.04	4.04	
CAR-3	3.073	3.20	9.50	11.10	1.60	0.13	1.60	0.079	79.38	7.94	0.04	4.13	4.68
	3.022	3.18	9.50	11.20	1.70	0.16	1.48	0.107	106.76	10.68	0.05	5.23	
CAR-4	3.019	3.15	9.50	11.10	1.60	0.13	1.55	0.085	84.52	8.45	0.04	4.34	4.78
	3.212	3.38	9.50	11.25	1.75	0.17	1.63	0.103	103.07	10.31	0.05	5.23	
ADOQUINES HECHOS CON AGREGADOS RECICLADOS Y CAUCHO													
CARYC-1	2.608	2.65	10.8	12.25	1.45	0.04	1.20	0.035	35.00	3.50	0.02	1.61	1.44
	2.518	2.55	10.8	12.30	1.50	0.03	1.05	0.030	30.48	3.05	0.01	1.27	
CARYC-2	2.185	2.25	10.8	12.25	1.45	0.06	0.80	0.081	81.25	8.12	0.03	2.97	2.73
	2.215	2.27	10.8	12.2	1.40	0.06	0.87	0.063	63.22	6.32	0.02	2.48	
CARYC-3	2.454	2.55	10.8	12.35	1.55	0.10	1.00	0.096	96.00	9.60	0.04	3.91	3.64
	2.411	2.492	10.8	12.25	1.45	0.08	1.04	0.078	77.74	7.77	0.03	3.36	
CARYC-4	2.394	2.44	9.50	11.00	1.50	0.04	0.94	0.047	46.91	4.69	0.02	1.84	1.89
	2.41	2.457	9.5	11.250	1.75	0.05	0.71	0.066	66.48	6.65	0.02	1.95	

TABLA A.8.- ABSORCIÓN MÁXIMA INICIAL EN ADOQUINES RECTANGULARES												
Nomenclatura	Peso Seco (gr)	Ancho (cm)	Largo (cm)	Área (cm ²)	Espesor (cm)	Peso húmedo (gr)	M = Pi - Po	100 M	√t	S√t	Cb (g/min)	
ADOQUINES HECHOS CON AGREGADOS RECICLADOS												
CAR-1	4156	12.1	20.3	245.63	8.0	4162	6.000	600.00	3.16	776.75	0.772	
CAR-2	3935	12.2	20.2	246.44	8.2	3944	9.000	900.00	3.16	779.31	1.155	
CAR-3	2697	12.1	20.2	244.42	5.8	2710	13.000	1300.00	3.16	772.92	1.682	
CAR-4	2699	12.2	20.2	246.44	5.4	2719	20.000	2000.00	3.16	779.31	2.566	
ADOQUINES HECHOS CON AGREGADOS RECICLADOS Y CAUCHO												
CARYC-1	2481	12.3	20.3	249.69	5.8	2497	16.000	1600.00	3.16	789.59	2.026	
CARYC-2	2098	12.2	20.0	244.00	5.8	2123	25.000	2500.00	3.16	771.60	3.240	
CARYC-3	2011	12.2	20.0	244.00	5.9	2035	24.000	2400.00	3.16	771.60	3.110	
CARYC-4	2421	12.2	20.2	246.44	6.0	2422	1.000	100.00	3.16	779.31	0.128	

TABLA A.9.- ABSORCIÓN MÁXIMA INICIAL EN ADOQUINES FIGURA "I"										
Nomenclatura	Peso Seco (gr)	Área (cm ²)	Espesor (cm)	Peso húmedo (gr)	M = Pi - Po	100 M	√t	S√t	Cb (g/min)	
ADOQUINES HECHOS CON AGREGADOS RECICLADOS										
CAR-1	4504	254.45	8.3	4513	9	900	3.16	804.64	1.119	
CAR-2	4262	254.45	8.2	4276	14	1400	3.16	804.64	1.740	
CAR-3	3130	252.30	6.3	3145	15	1500	3.16	797.84	1.880	
CAR-4	3095	252.30	6.0	3112	17	1700	3.16	797.84	2.131	
ADOQUINES HECHOS CON AGREGADOS RECICLADOS Y CAUCHO										
CARYC-1	2603	256.72	5.8	2620	17	1700	3.16	811.82	2.094	
CARYC-2	2192	245.32	5.7	2213	21	2100	3.16	775.77	2.707	
CARYC-3	2449	251.00	6.0	2470	21	2100	3.16	793.73	2.646	
CARYC-4	2518	253.46	5.8	2534	16	1600	3.16	801.50	1.996	



BIBLIOGRAFIA

CONSULTA DE LIBROS

- [1] A.A. Lilley, B.J. Walker. **“Adoquines de concreto”**. IMCYC; 1988, 135 paginas.
- [2] Neville, Adam M. **“Tecnología del concreto”**. Ed. Trillas; 1998, 329 paginas.
- [3] Rivera L., Gerardo. “Concreto simple”. Universidad del Cauca.

CONSULTA DE TESIS

- [4] Varela Sotomayor, Salvador. **“Diseño y construcción de pavimentos a base de adoquín de concreto”**. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Civil. Universidad Anáhuac, 1991; 98 pag.
- [5] García Quintanal, María Teresa. **“El adoquín; usos, ventajas y manufactura”**. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Mecánico Electricista. Universidad Nuevo Mundo, 1985; 93 paginas.
- [6] Méndez García, Claudio. **“Aspectos generales de pavimentos con adoquines de concreto hidráulico”**. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM; 1992, 130 pag.
- [7] Lara Cano, Manuel Eduardo. **“Pavimento de adoquines de concreto hidráulico”**. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Civil. FES Acatlán, UNAM; 1984, 117 paginas.
- [8] Cruz García, Jorge Arturo; Velázquez Yáñez, Ramón. **“Concreto reciclado”**. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Civil. ESIA Zacatenco, IPN; 2004, 110 paginas.
- [9] Castañeda Cruz, Kathereen Jhoanna; Vásquez Barreto, Eer Lenner. **“Aplicación de concreto reciclado en la producción de adoquines de concreto para pavimentos de tránsito vehicular ligero en la ciudad de Chiclayo”**. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Civil. Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Señor de Sipán; 2013.
- [10] Martínez Soto, Iris Esmeralda. **“Reciclaje de concreto premezclado para la fabricación de agregados”**. Tesis que para obtener el grado de Maestro en Construcción. Facultad de Ingeniería, UNAM; 2005, 81 paginas.
- [11] Martel Vargas, Guerry Jack. **“Caracterización de residuos de la construcción y demolición de edificaciones para su aprovechamiento”**. Tesis que para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería, UNAM; 2008, 191 paginas.
- [12] Díaz Camacho, Edith. **“Aplicación de material reciclado en la construcción”**. Tesis que para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad Villa Rica; 2013, 123paginas.
- [13] Rivera Valdovinos, Claudia Lizett. **“Análisis ambiental para el mercado de los residuos de la construcción en la zona metropolitana de la ciudad de México”**. Tesis que para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería, UNAM; 2008, 176 paginas.



CONSULTA DE NORMAS

- [14] NMX-C-036-ONNCCE-2004. Industria de la construcción - Bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines - Resistencia a la compresión - Método de prueba.
- [15] NMX-C-037-ONNCCE-2005. Industria de la construcción – Bloques, ladrillos o tabiques y tabicones – Determinación de la absorción de agua y absorción inicial de agua.
- [16] NMX-C-073-ONNCCE-2004. Industria de la construcción – Agregados – Masa volumétrica – Método de prueba.
- [17] NMX-C-077-ONNCCE-1997. Industria de la construcción – Agregados para concreto – Análisis granulométrico – Método de prueba.
- [18] NMX-C-088-ONNCCE-1997. Industria de la construcción – Agregados – Determinación de impurezas orgánicas en el agregado fino.
- [19] NMX-C-111-ONNCCE-2004. Industria de la construcción – Agregados para concreto hidráulico – Especificaciones y métodos de prueba.
- [20] NMX-C-154-ONNCCE-2010. Industria de la construcción – Concreto hidráulico – Determinación del contenido de cemento en concreto endurecido.
- [21] NMX-C-164-ONNCCE-2002. Industria de la construcción – Agregados – Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso.
- [22] NMX-C-165-ONNCCE-2004. Industria de la construcción – Agregados – Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado fino – Método de prueba.
- [23] NMX-C-314-ONNCCE-2014. Industria de la construcción – Mampostería - Adoquines para uso en pavimentos - Especificaciones y métodos de ensayo (cancela a la NMX-C-314-1986).
- [24] NMX-C-303-ONNCCE-2010. Industria de la construcción – Determinación de la resistencia a flexión usando una viga simple con carga en el centro del claro.
- [25] NTG 41086 - 2012. Adoquines de concreto para pavimentos. Especificaciones
- [26] NTG 41087 h2 – 2012. Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia al desgaste por abrasión de adoquines de concreto.

SITIOS WEB

- [27] <http://www.imcyc.com/cyt/mayo05/POSIBILIDADES.pdf>
- [28] <http://www.imcyc.com/revistacyt/abr10/pavimentos.htm>
- [29] <http://www.historiadelascivilizaciones.com/2012/08/las-calzadas-romanas-historia.html>
- [30] <http://www.mitbaby.com/ruta-cicloturistica-por-la-via-apia-antica-1073.html>
- [31] <http://www.elonce.com/secciones/institucionales/452994-se-retomn-la-fabricacinn-de-adoquines-en-villa-elisa.htm>



[32] http://www.pueblosmexico.com.mx/pueblos_mexico_lista.php?id_rubrique=284

[33] <http://blog.construmatica.com/maquina-pavimentadora-crea-carreteras-de-adoquines-como-si-fuera-una-alfombra/>

[34] <http://momentosdelpasado.blogspot.mx/2016/04/el-bombardeo-de-londres-en-la-segunda.html>