

Diseño de Mezcla de Concreto Reciclado Mediante el Reemplazo del Agregado Grueso por Neumáticos Triturados

Ismael A. Cotty Ramírez

Ingeniería Civil

Alberto L. Guzmán De La Cruz, PhD.

Departamento de Ingeniería Civil

Universidad Politécnica de Puerto Rico

Sinopsis — En este proyecto se realizó el análisis y comparación de mezclas de hormigón reciclado reemplazando parte del agregado grueso por neumáticos usados triturados. Se investigó el efecto de la adherencia en la resistencia tratando al neumático triturado, por dos minutos, con un solvente (Aguarrás) antes del mezclado de materiales. El reemplazo de agregado se realizó por volumen y en porcentos de 10%, 20%, 30% y 40% para mezclas tratadas y sin tratar con el solvente respectivamente. Se produjeron reducciones en la resistencia a compresión desde 33% a 72% en mezclas tratadas y sin tratar, respectivamente, en ciertos casos. El tratamiento del neumático previo al mezclado produjo incrementos de resistencia a compresión de hasta un 28%, en algunos casos.

Términos Clave — Concreto Reciclado, Neumáticos Reciclados, Goma Triturada, Hormigón con Goma.

INTRODUCCIÓN

En Puerto Rico, en la actualidad, la acumulación de neumáticos desechados es uno de los problemas ambientales que más importancia ha tomado en los últimos años. En países desarrollados la producción es mayor cada año y los métodos para la disposición final, como la colocación en vertederos, ya no son permitidos. Esto genera la necesidad de buscar nuevas alternativas para darle una disposición apropiada a los neumáticos desechados [1]. En Puerto Rico el problema debe ser atendido con prontitud. La Autoridad de Desperdicios Sólidos estima que en Puerto Rico se desechan diariamente dieciocho mil (18,000) neumáticos, lo que representa sobre 4.7 millones anuales (ADS, 2008). Estas cifras tan alarmantes es

producto del manejo y la disposición final inapropiada de los neumáticos en los últimos años.

Los neumáticos desechados se utilizan comúnmente como combustible en producción de energía eléctrica, barreras de seguridad, barreras de sonido, muros de contención Geo-textil, como modificador de asfalto (Rubber Modified Asphalt, RMA), en usos no estructurales en los vertederos y aplicaciones atlética y de recreación, entre otros [2]. Sin embargo, la cantidad de neumáticos desechados aumenta a una razón mucho mayor que el uso que se le pueda proveer sin que se produzca ningún tipo de impacto al medio ambiente.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los objetivos principales de esta investigación fueron la determinación del efecto del reemplazo de goma triturada por agregado grueso en la resistencia a compresión del hormigón y el efecto, a dicha resistencia, de usar goma triturada tratada con un solvente en base de trementina (aguarrás).

REVISIÓN DE LITERATURA

En las siguientes secciones se discuten brevemente los temas más importantes para el desarrollo de este trabajo. Estos representan el cuerpo principal de conocimientos relacionados con este proyecto.

Hormigón

El hormigón es uno de los materiales más utilizados para la construcción en Puerto Rico. Se utiliza en pavimentos, puentes, edificios, casas, muros de retención de suelos, entre otros. En esencia, el hormigón es un mezcla de agregado fino (arena), agregado grueso (grava), agua y cemento

(agente conglomerante). Es un material, cuya principal característica estructural, es que resiste muy bien los esfuerzos de compresión, por lo que es la propiedad más buscada y deseada en una mezcla de hormigón.

Cemento Portland

El Cemento Portland es uno de los componentes básicos para la elaboración del concreto, su nombre se debe a Joseph Aspdin, un albañil inglés quien en 1824 obtuvo la patente para este producto. Por la semejanza con una caliza natural que se extrae en la Isla de Portland, Inglaterra, se le denominó Cemento Portland.

Los cementos Portland son conglomerantes hidráulicos compuestos principalmente de silicatos de calcio hidráulicos, esto es, fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua. En esta reacción, denominada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una pasta, y cuando se le añade arena y grava triturada, se forma lo que se conoce como el material más versátil utilizado para la construcción, el concreto.

El ASTM C-150, menciona ocho tipos de Cemento Portland. En este proyecto se utilizó el Tipo I, considerado un cemento de uso general, y se emplea cuando no se requiere de propiedades y características especiales que lo protejan de sulfatos, cloruros y temperaturas originadas por calor de hidratación.

Agregados Finos y Gruesos

Los agregados finos y gruesos ocupan de 60% a 75% del volumen del concreto (79% a 85% en peso), e influyen notablemente en las propiedades del concreto. Los agregados finos comúnmente consisten en arena natural o piedra triturada que pasan un tamiz No. 4 (4.75 mm). Los agregados gruesos consisten en una grava o una combinación de grava o agregado triturado, que son retenidos por un tamiz No. 4 (4.75 mm) [3].

Propiedades básicas de los Agregados

A continuación se muestran algunas de las propiedades más importantes de los agregados.

Estas propiedades se determinaron para los obtener las proporciones de los materiales para el diseño de mezcla de este proyecto.

- **Granulometría de los Agregados:** Para determinar la distribución de tamaños de los agregados y conseguir la mejor combinación posible de acuerdo a las especificaciones del "American Society of Testing and Materials" (ASTM). Estos agregados pueden ser arena de playa, arena de río, gravilla y piedra. La gradación es un factor importante, ya que de este factor dependen la economía, manejabilidad y resistencia de la mezcla de hormigón.
- **El Módulo de Finura de la Arena:** Denota la gradación de las partículas de la arena. Mientras más pequeño el número, más fina será la arena. Una arena que satisfaga las especificaciones del ASTM para hormigón debe tener valores entre 2.3 y 3.1.
- **Gravedad Específica de los Agregados:** Es la relación entre la densidad del material y la densidad del agua. Esto nos permite hacer una relación entre el peso de los agregados y el volumen que ocupa dentro de la mezcla.
- **Absorción de los Agregados:** La capacidad de absorción se determina encontrando el peso de un agregado bajo condición saturada y seca. La diferencia en pesos expresada como porcentaje del peso seco es la capacidad de absorción. Esta información se requiere para balancear las necesidades de agua en la mezcla de hormigón.
- **Peso Unitario de los Agregados:** Da una medida de los vanos en un volumen unitario de agregado. Este valor se utiliza para determinar la cantidad de agregado grueso que puede ser acomodado en una mezcla de hormigón.
- **Impurezas Orgánicas e Inorgánicas del Agregado Fino:** Las impurezas inorgánicas como arcillas o excesos de finos pueden ser un factor de contaminación y usualmente requieren más agua y cemento resultando la mezcla más costosa y con mayor posibilidad de agrietamiento al secarse. [4]

Resistencia a la Compresión del Hormigón Endurecido

La resistencia a la compresión es una de las propiedades técnicas más importantes. El hormigón se emplea principalmente para resistir esfuerzos de compresión. Por lo tanto, la resistencia a la compresión se utiliza como una medida de la calidad general del hormigón.

Aproximadamente de un diez por ciento (10%) a un veinte por ciento (20%) de la resistencia a compresión del hormigón corresponde a resistencia a la tensión. En la práctica, la resistencia a la tensión y flexión son usadas frecuentemente en vigas y losas.

La resistencia a la flexión es una medida de la capacidad de momento de una viga o losa de concreto no reforzada. Se mide mediante la aplicación de cargas a elementos de vigas de concreto con una sección transversal de 36 in² (6"x6") y veinte pulgadas (20") de largo. La resistencia a la flexión se expresa como el Módulo de Ruptura (MR) en libras por pulgada cuadrada (psi) y es determinada mediante el método de ensayo ASTM C-78 (carga en los puntos tercios).

El Módulo de Ruptura es cerca del veinte por ciento (20%) de la resistencia a compresión del hormigón [5]. El tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado, afectan la resistencia del hormigón considerablemente, sin embargo, la mejor correlación para dicho materiales es obtenida mediante ensayos de laboratorio [6].

Diseño de Mezcla del Hormigón

El diseño de la mezcla del hormigón se considera el proceso de elegir los ingredientes adecuados del hormigón y la determinación de sus cantidades relativas con el propósito de producir un hormigón con propiedades mínimas determinadas, notable resistencia, durabilidad y consistencia deseada.

Todo diseño se basa en la hipótesis de una resistencia mínima de compresión deseada del hormigón, no obstante, la resistencia real del hormigón producido es una cantidad variable. Por lo tanto, toda mezcla de hormigón es siempre

dirigida a una capacidad promedio mayor que el mínimo [7].

Especificación del ASTM

El ASTM es una organización internacional que desarrolla y publica técnicas estándar para pruebas de laboratorio a materiales. En la Tabla 1 se mencionan algunos de los ASTM que se utilizaron como referencia en éste proyecto [8].

**Tabla 1
Resumen de los ASTM Utilizados**

ASTM	Descripción
ASTM D75 / D75M - 09	Práctica estándar para muestreo de agregados.
ASTM C702 / C702M - 11	Práctica estándar para la reducción de las muestras de agregados al tamaño de prueba.
ASTM C136 - 06	Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.
ASTM C128 - 07a	Método de prueba estándar para la gravedad específica y la absorción del agregado fino.
ASTM C127 - 07	Método de prueba estándar para determinar la densidad (gravedad específica) y absorción del agregado grueso.
ASTM C33 / C33M - 11a	Especificaciones estándar para los agregados del hormigón.
ASTM C40 / C40M - 11	Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas de agregados finos para hormigón.
ASTM C1064 / C1064M - 11	Método de prueba estándar para la temperatura del concreto recién mezclado de cemento hidráulico.
ASTM C143 / C143M - 10a	Método de prueba estándar para el asentamiento de hormigón de cemento hidráulico.
ASTM C172 / C172M - 10	Práctica estándar para muestreo de concreto recién mezclado.
ASTM C192 / C192M - 07	Practica estándar para fabricar y curar muestras para pruebas de concreto en el laboratorio.
ASTM C39 / C39M - 12	Método de prueba estándar para la resistencia a compresión de cilindros de muestras o pruebas de concreto.
ASTM C78 / C78M - 10	Método de prueba estándar para resistencia a la flexión del concreto (Usando una viga simple con un tercer punto de carga)
ASTM C469 / C469M - 10	Método de prueba estándar para el módulo de elasticidad y coeficiente de "Poisson" del hormigón en compresión.

Selección de Proporciones de la Mezcla de Hormigón según el método americano

El ACI 211.1 - 91 describe un método que consiste en una secuencia de pasos lógicos que toman en cuenta las características del material a

utilizar [9]. Estos pasos son descritos a continuación.

1. Selección del asentamiento. La caída será determinada por las especificaciones de construcción con un mínimo y un máximo.
2. Selección del tamaño máximo del agregado grueso. Esto dependerá de los requisitos geométricos de un tamaño y espaciado de refuerzo.
3. Estimación del contenido de agua y el contenido de aire. El contenido de agua dependerá del asentamiento requerido, el tamaño máximo del agregado, su forma, textura y clasificación. El contenido de aire dependerá de la utilización de aditivos con plastificación o propiedades reductoras de agua y la temperatura del hormigón.
4. Selección de la relación Agua / Cemento (w/c). Esto dependerá de la resistencia deseada y la durabilidad del hormigón.
5. Cálculo del contenido de Cemento. El resultado de los pasos 3 y 4 da el contenido de cemento directamente, es el contenido de agua dividida por la relación agua / cemento.
6. Estimación del Contenido de Agregado Grueso. Esto dependerá del tamaño máximo de agregado y el módulo de finura del agregado fino.
7. Estimación del Contenido de Agregado Fino. La masa de agregado fino se puede obtener directamente restando la masa total del otro ingrediente de la masa de una unidad de volumen del hormigón.
8. Hacer los ajustes para mezclar las proporciones. Se resumen todos los pesos de los materiales a ser usados para una yarda de hormigón. El diseño se hace para una yarda de hormigón y luego se hace el ajuste para obtener la cantidad de los materiales a ser mezclados en el laboratorio.

Neumático Triturado Utilizado

La compañía que proveyó el material para este proyecto fue “Integrated Waste Management”, en Peñuelas, Puerto Rico, bajo la autorización del Ing.

Julio González Fortuño, propietario. Esta compañía actualmente no esta en operación. Dicha compañía había adquirido, de la corporación Columbus McKinnon en Sarasota, Florida, uno de sus sistemas de reciclaje de neumáticos “The CM4R Liberator”.

El sistema es capaz de procesar neumáticos de automóviles de pasajeros y de camiones en una tasa de producción de 10,000 lbs. por hora. Es un sistema de tres etapas que puede ser fácilmente ampliado según el mercado para materiales derivados de los neumáticos se desarrolle y expanda. Todas las etapas del sistema son operadas independientemente para maximizar la eficiencia a través de la venta y la calidad del producto. La Tabla 2 presenta las diferentes tasas de producción del “CM4R Liberator”.

Tabla 2
Tasas de Producción de la CM4R Liberator

Tasa de producción - neumáticos de coches y de camiones	
Tamaño de 5/8"	3 toneladas/hora
Tamaño de 3/4"	5 toneladas/hora
Tamaño de 1.00"	6 toneladas/hora
Tamaño de 1.25"	7 toneladas/hora
Tamaño de 1.5"	8 toneladas/hora
Tamaño de 1.75"	9 toneladas/hora

*Dependiendo del uso específico, las tasas pueden variar.

En la etapa de reducción de tamaño (“Size Reduction Stage”, SRS) una vez pre-triturados los neumáticos son luego procesados con la trituradora de circuitos CM (“CM Chip Shredder”). El Material es procesado para poder ser usado como Agregado Derivado de Neumático (“Tire Derived Aggregate”, TDA), Combustible Derivado de Neumático (“Tire Derived Fuel”, TDF) ilustrado en la Figura 2, ó cedidos para su posterior procesamiento en la etapa de liberación del acero y luego triturado casi por completo a lo que se le llama “Crumb Rubber”, como se puede ver en la Figura 1. [10]



Figura 1
“Crumb Rubber”

Figura 2
“Tire Chips” o “TDF”

Usos comunes de los Neumáticos Desechados Generados en Puerto Rico

En Puerto Rico, como medida para reciclar los neumáticos usados, existen varios métodos ó alternativas. Las más usadas se discuten a continuación.

- **Exportación de Neumáticos:** Al presente, hay varias empresas autorizadas por la Junta de Calidad Ambiental, las cuales exportan neumáticos desechados por vía marítima, ya sean enteros o compactados. Estos son exportados a instalaciones autorizadas en Estados Unidos para ser utilizados como TDF para la recuperación de energía en cementeras o al mercado asiático para su uso como materia prima para fabricar otros productos.
- **Recuperación de Energía:** Actualmente, hay una empresa autorizada por la Junta de Calidad Ambiental, para utilizar neumáticos desechados en la recuperación de energía. Dicha instalación es la concretera CEMEX en Ponce, Puerto Rico, consume un promedio de 700,000 neumáticos desechados anualmente.
- **Barreras de seguridad:** Se usan gomas enteras para formar barreras en las pistas de autos de carreras para evitar daño a vehículos o espectadores en caso de accidente. También se utilizan para atracaderos de embarcaciones.
- **Barreras de Sonido:** Estas barreras capturan el 80% del ruido que se produce en las vías de rodaje. La forma ondulada de estas barreras capturan las frecuencias bajas de los ruidos y la parte rocosa permite capturar las frecuencias altas a través de los hoyos que se encuentran en estas barreras. Cada barrera utiliza aproximadamente 600 libras de neumáticos triturados (tamaño 5/8). Esto equivale a la utilización de 26 neumáticos por barrera de sonido.
- **Artículos de Goma:** Se fabrican artículos de goma reciclada como el “crum rubber”, el cual se usa para hacer productos como bases de alfombras, pistas atléticas, baldes y cubiertas para los parques de juego infantiles. Otras

personas también utilizan este material para artes manuales.

- **Muros de Contención Geo-textil:** Se pueden utilizar neumáticos desechados enteros en los parques nacionales como estructuras de contención. Los neumáticos se atan para formar un muro de contención geo-textil en las zonas inclinadas, o muy expuestas, a lo largo de las carreteras. Normalmente son menos costosos que el material convencional, son abundantes y pueden obtenerse rápidamente.
- **Relleno ó Agregado:** Se ha utilizado para construir terraplenes y estabilizadores de taludes como material de relleno selecto en una proporción 1:1 donde se sustituye el agregado proveniente de corteza terrestre por neumáticos triturados.
- **Modificador de Asfalto (“Rubber Modified Asphalt” – RMA):** Los neumáticos pulverizados se pueden añadir a la mezcla asfáltica para modificar favorablemente las propiedades del mismo en las construcciones de las autopistas y carreteras.

El uso del RMA retrasa el deterioro de las carreteras y disminuye el ruido que generan los automóviles cuando transitan por ellas. Esta tecnología ha sido altamente estudiada alrededor del mundo y la “Asphalt Rubber Association” la recomienda.

En Estados Unidos el “Asphalt Rubber” se está utilizando desde los años 40. Se ha adoptado en muchos estados y diferentes países alrededor del mundo. La diferencia entre una carretera hecha con “Rubber Asphalt” y otra hecha con asfalto normal es que, la primera es menos ruidosa, es más suave el manejo sobre ella, tiene más agarre y se conserva por más tiempo. Aunque estas carreteras inicialmente son más costosas, a largo plazo resultan más económicas puesto que apenas hay que darle mantenimiento y duran mucho más.

- **Aislador Termal:** Resultados de pruebas hechas en la Universidad de Maine mostraron que el utilizar los neumáticos para construir

carreteras y muros de contención, entre otros reduce la penetración de la nieve.

En Puerto Rico se puede utilizar los neumáticos pulverizados para construir paredes de hormigón y bloques, ya que esto nos puede ayudar a retener el frío en el interior y puede tener un impacto positivo en el uso de energía. Se pueden utilizar para construir paredes de frigoríficos, cárceles, entre otros.

- **Uso no Estructural en los Vertederos:** Las regulaciones federales requieren que en los vertederos se utilice una cobertura o película plástica en el fondo de la celda del relleno sanitario antes de arrojar basura. En la misma se colocan varias capas de arena y gravilla que sirven para detener el acceso al subsuelo de los lixiviados.

De esta forma los neumáticos granulados proveen drenaje para los lixiviados generados por el relleno sanitario y sustituyen la arena y la gravilla utilizadas para estos propósitos, reduciendo así el uso de material de la corteza terrestre.

- **Aplicaciones Atlética y de Recreación:** Este es uno de los mercados que ha crecido más rápidamente en los pasados años. Este mercado incluye, pero no se limita, el uso en las pistas de trotar, como superficie en grama, estadios, áreas de juego, jardines el llamado “Mulch” y para pistas de carreras de caballos, entre otros.

Esta es una tecnología que se puede utilizar en los parques, pistas y caminos, entre otros que se puedan desarrollar en Puerto Rico.

Además, se pueden utilizar en las remodelaciones de instalaciones como las mencionadas. Esto provee un área de soporte al caminar creando comodidad y seguridad a las personas que utilicen estas instalaciones [1].

- **Remoción de Sustancias Químicas Tóxicas del Ambiente:** Científicos de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez han explorado el uso de gomas usadas trituradas para remover sustancias tóxicas de los cuerpos de agua.

Los científicos descubrieron que dos ingredientes de las gomas trituradas, el carbono

y el polímero estireno-butadieno, sí son capaces de absorber tolueno y xileno en cantidades significativas, esto sin que la goma triturada contaminara la solución con otros de sus componentes.

Este estudio demuestra que, en teoría, la goma triturada se puede usar de manera costo-efectiva para remover tolueno y xileno de los cuerpos de agua. Es muy probable que esta tecnología, estudiada en una universidad de Puerto Rico, pueda comercializarse a nivel internacional. [11]

- **Sustituto de los Agregados en Mezcla de Concreto:** La posibilidad de utilizar gomas trituradas como agregado para las mezclas de concreto ha sido estudiada numerosas veces. Unos resultados revelaron una disminución considerable en las propiedades mecánicas del material, como la resistencia a la compresión y a la tensión [12].

Estudios más recientes lograron estabilizar el efecto de la goma en la mezcla obteniendo resultados favorables en pruebas de compresión y tensión. Khatib y Bayomy [13] estudiaron el comportamiento de muestras de concreto con diferentes cantidades de goma triturada. Sus resultados revelan que para obtener resultados similares a la mezcla convencional de concreto, el contenido óptimo de material reciclado no debería exceder el 20% del volumen total de agregado.

Cualidades del concreto con goma triturada, como su peso unitario, lo hacen aplicable para propósitos arquitectónicos como fachadas y elementos decorativos. Al ser una mezcla más liviana puede utilizarse en lugares donde se requieran elementos de concreto no estructurales.

Es importante redundar en el hecho de que la mezcla no debe utilizarse para propósitos estructurales por su pérdida de resistencia.

Se recomienda el uso de esta mezcla para la construcción de aceras peatonales, caminos para ciclistas y deportistas. Losas a las que no se les apliquen grandes cargas.

METODOLOGÍA

La primera fase de este proyecto consistió de la determinación de las propiedades físicas de la goma triturada y de los agregados que se utilizaron para las mezclas de hormigón.

La goma fue tamizada para utilizar los tamaños retenidos hasta el tamiz No. 4, que es el tamaño típico de un agregado grueso. A este material se le removió la mayoría de las impurezas de nilón presentes, estimando una remoción del 85% del nilón.

En la segunda fase se realizó el diseño de la mezcla de hormigón. Esta se elaboró para una resistencia de compresión de 3,000 psi. La proporción de materiales del diseño de mezcla se realizó para un total de 10 cilindros (4" de diámetro) y 2 vigas (6"x6"x20") para cada una de las mezclas del experimento (tratadas y no tratadas con solvente).

La tercera fase consistió de la elaboración de las mezclas de control del proyecto.

En la cuarta fase se procedió con la realización de las primeras 4 mezclas de hormigón donde se sustituyó el agregado grueso por goma triturada en un 10%, 20%, 30% y 40% de su volumen por goma triturada.

En estas cuatro mezclas la goma utilizada no fue tratada con ningún solvente químico. Luego de realizadas las mezclas según los estándares se procedió a ubicar las muestras en el tanque de curado donde se monitoreaba la temperatura.

En la quinta fase se realizaron 4 mezclas de hormigón con goma tratada con esencia de trementina (aguarrás) por dos (2) minutos y luego se lavó con agua para eliminar el solvente. Se sustituyó el 10%, 20%, 30% y 40% del volumen del agregado grueso. Luego de realizadas las mezclas, según los estándares, se procedió a ubicar las muestras en el tanque de curado al cual se le monitoreara la temperatura. [14]

En la última fase se procedió con la realización de las pruebas de resistencia en compresión de los cilindros y las pruebas de flexión en las vigas a los 7 y 28 días correspondientes para cada mezcla.

RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio. En la Tabla 3 y Tabla 4 se ilustran las propiedades del neumático triturado y agregados usados en este proyecto, respectivamente. En la Tabla 5 se muestran los valores finales, de peso y volumen, de los integrantes usados para preparar las mezclas de hormigón de éste proyecto.

Tabla 3
Propiedades de la Goma Triturada

Propiedades	Neumático Reciclado
Gravedad Específica	1.02
Peso Unitario	7.60 lb/ ft ³
% de Absorción	20%
Impureza Orgánica	3

Tabla 4
Propiedades de los Agregados

Propiedades	Piedra	Arena
Gravedad Específica	2.65	2.42
Peso Unitario	94.59 lb/ft ³	-----
% de Absorción	1 %	1.5 %
Contenido de humedad	1 %	1.9 %
Modulo de finura	-----	3.41

Estos valores fueron ajustados para las proporciones requeridas para las pruebas realizadas. Estos ajustes están en la Tabla 6, para un asentamiento de 3 a 1 pulgada.

Tabla 5
Diseños de la Mezcla

Material	Peso (lb/yd ³)	Volumen (ft ³)
Agua	340	5.45
Cemento	576.27	2.93
Piedra	1,532.36	9.267
Arena	1290.06	8.543
Aire	-----	0.81

Tabla 6
Ajuste de la Mezcla

Material	Peso (lb)
Piedra	107
Arena	95
Cemento	40
Agua	26

A todas las Mezclas se le hicieron las pruebas de asentamiento mejor conocida como la prueba del "Slump" y se le tomo la temperatura a las Mezclas. Estos resultados se muestran en la Tabla 7 para las mezclas de control, con sustitución con goma sin tratar (GsT) y con goma tratada (GT).

Tabla 7
Resultados de "Slump" y Temperatura

Mezcla	"Slump" (pulgadas)	Temperatura (°F)
Control	1	82.3
GsT 10%	2 ½	83.8
GsT 20%	1 ½	84.5
GsT 30%	1 ½	84.3
GsT 40%	2 ½	83.2
GT 10%	2	80.1
GT 20%	1	80.4
GT 30%	2 ½	79.5
GT 40%	2	78.8

La Tabla 8 muestra los promedios de las pruebas de resistencia a la compresión que se realizaron a todas las mezclas. Estos resultados se promediaron de 3 cilindros a los 7 y 28 días.

Tabla 8
Resistencia a Compresión de las Mezclas

Mezcla		f'c (psi)	
		7 (días)	28(días)
Control		2,350	3,080
GsT	10%	840	1,680
	20%	930	1,680
	30%	680	1,380
	40%	410	890
GT	10%	1,650	2,070
	20%	1,180	1,700
	30%	780	1,150
	40%	790	1,000

En las tablas 9 y 10 se encuentran los porcentos de perdida en resistencia a compresión de las mezclas de GsT y GT las cuales fueron comparadas con la mezcla de control.

Tabla 9
Porcentos de Perdida en Compresión de la Mezcla de Goma sin Tratar vs. la Mezcla de Control

Días	GsT 10%	GsT 20%	GsT 30%	GsT 40%
7	64.26	60.43	71.06	82.55
28	45.45	45.45	55.19	71.10

Tabla 10
Porcentos de Perdida en Compresión de la Mezcla de Goma Tratada vs. la Mezcla de Control

Días	GT 10%	GT 20%	GT 30%	GT 40%
7	29.79	49.79	66.81	66.38
28	32.79	44.81	62.66	67.53

La Figura 3 presenta la gráfica de resistencia en compresión por mezclas. Se ilustran los resultados de las mezclas de control y de GsT.

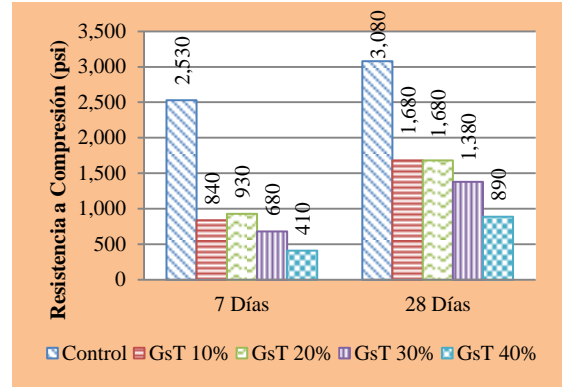


Figura 3
Gráfica de Resistencias de Compresión

En la Tabla 11 se encuentran todos los resultados de las pruebas de flexión para el módulo de ruptura.

Tabla 11
Resistencia a Flexión de las Mezclas

Mezcla		Módulo Ruptura (psi)	
		7 (días)	28(días)
Control		400	540
GsT	10%	250	330
	20%	230	400
	30%	250	280
	40%	160	160
GT	10%	410	420
	20%	290	330
	30%	230	240
	40%	270	230

La Figura 4 y 5 presentan los resultados para el módulo de ruptura de las mezclas de control, mezclas tratadas y sin tratar, para los 7 y 28 días.

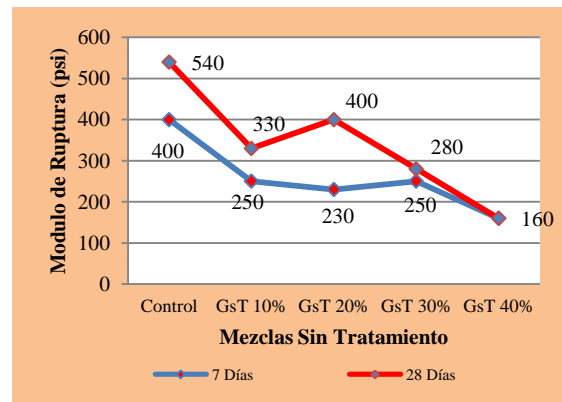


Figura 4
Gráfica del Modulo Ruptura

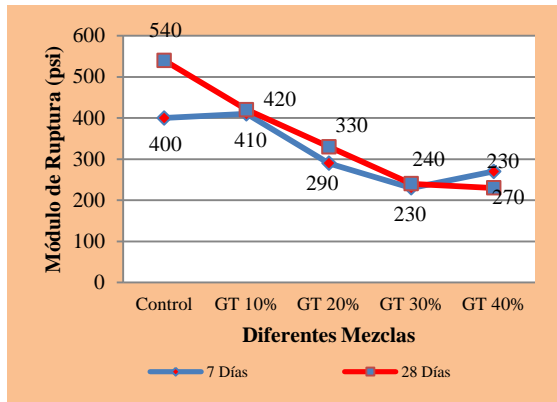


Figura 5
Gráfica del Modulo Ruptura

La Figura 6 presenta la gráfica de resistencia por mezclas. Se ilustran los resultados de las mezclas de control y de GT.

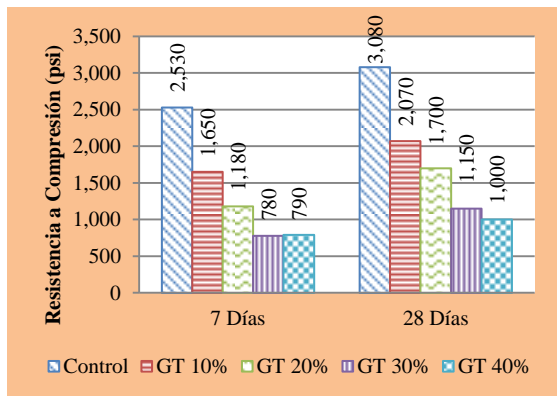


Figura 6
Gráfica de Resistencias de Compresión

CONCLUSIÓN

Analizando los resultados podemos concluir lo siguiente:

Reemplazar el agregado grueso por neumático triturado en una mezcla de hormigón, reduce la resistencia a compresión de la misma. El porcentaje de reducción es mayor en la medida que aumente el volumen de remplazo.

Se comprobó que hay un efecto notable en la adherencia de la goma con el material de la mezcla y la resistencia a compresión. En las pruebas realizadas, se pudo observar que en las mezclas donde el neumático no fue tratado con el solvente, el material no tenía buena adherencia al hormigón.

Al momento de fallar los cilindros en las pruebas, se pudo notar que la goma de la muestra podía desprenderse con facilidad, limpia y sin residuos de hormigón. No obstante, en las mezclas donde la goma fue tratada con el solvente se observó que hubo mejor adherencia, puesto que al fallar los cilindros en las pruebas, se pudo percibir que al tratar de desprender la goma de la mezcla estos no se desprendían con facilidad y salían con residuos de hormigón.

El tratamiento del neumático con el solvente (aguarrás) previo al mezclado de materiales aumenta la adherencia entre el neumático y la mezcla, resultando pérdida de resistencia menor en comparación con el caso donde no se trataba el neumático triturado. Se obtuvieron porcentos de reducción de resistencia de 46% a 71% para remplazos de 10% a 40%, en la mezcla sin tratar y porcentos de reducción de 33% a 68% para remplazos de 10% a 40%, respectivamente en la mezcla tratada.

Se entiende que por la contaminación que adquieren los neumáticos en la carretera y en el proceso de reciclado, contienen diferentes contaminantes como aceites u otros residuos, que no permiten que el neumático desarrolle buena adherencia a la mezcla de hormigón cuando no es tratada con el solvente.

En mezclas tratadas, se obtuvo un porcentaje de reducción de 33% y 45% para una sustitución de 10% y 20% respectivamente, desarrollando una resistencia de compresión de 2,070 psi y 1,700 psi, respectivamente. Estos valores de resistencia se consideran apropiados para usarse en hormigón no estructural o elementos estructurales donde no se requiere el uso de un hormigón de resistencia a compresión media-alta, como el caso de aceras, pavimentos en algunos tipos de estacionamientos, entre otros.

No obstante, se recomienda que se realicen mezclas de hormigón de hasta un 30% para ser utilizadas en elementos estructurales con hormigones de baja resistencia y además, evaluar la diferencia en costo de construcción al utilizar este tipo de mezcla en dichas estructuras.

REFERENCIAS

- [1] “Ley Núm. 135 de 12 de julio de 2011 Ley para el Manejo Adecuado de Neumáticos”, Autoridad de Desperdicios Sólidos, Recuperada el 16 de Mayo del 2012, Tomado de la página web http://www.ads.gobierno.pr/neumaticos/Ley_135.20110712.Neumaticos_JCA.pdf.
- [2] “Mercados y Usos de Neumáticos Desechados Generados en Puerto Rico”, Autoridad de Desperdicios Sólidos, Recuperada el 16 de Mayo del 2012, Tomado de la página web <http://www.ads.gobierno.pr/neumaticos/mercados.htm>
- [3] Mamlouk, M. and Zaniewski, J. “Materials for Civil and Construction Engineers”, 3rd Edition, Pearson, 2011.
- [4] Herrera Roldan, J. “Recycled Tire Derived Aggregate for Low Resistance Concrete Pavements”, David Dwight Eisenhower Transportation Fellowship Program, FHWA, Universidad Politécnica de Puerto Rico, 2010.
- [5] Nawy, E. G. “Reinforced Concrete, A fundamental Approach”, 5th Edition, Prentice Hall, 2003.
- [6] “El Concreto en la Práctica”, National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), Recuperada el 16 de Mayo del 2012, Tomado de la página web <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP16es.pdf>.
- [7] Neville, A. M. “Properties of Concrete”, 4^{ta} edición, Pearson Education, 1996.
- [8] “Standards”, American Standards for Testing Materials (ASTM), Recuperada el 16 de Mayo del 2012, Tomado de la página web <http://www.astm.org/Standard/index.shtml>.
- [9] “Proportioning Concrete Mixture”, American concrete Institute (ACI), Recuperada el 16 de Mayo del 2012, Tomado de la página web http://www.concrete.org/committees/committeehome.asp?committee_code=0000211-00.
- [10] “Building Turnkey Tire Recycling Equipment Solutions to Turn Old Tires into Profits”, CM Tire Recycling Equipment Solutions, Recuperada el 16 de Mayo del 2012, Tomado de la página web <http://www.cmtirerecyclingequipment.com>
- [11] Espada González, W. (2010), “Nuevo uso para las gomas usadas”, Recuperada el 16 de Mayo del 2012, Tomado de la página web http://www.cienciapr.org/podcasts_view.php?id=65.
- [12] Botero, J. H., Valentín, M. O., Acosta, F., y otros. “Gomas Trituradas: Estado del Arte, Situación Actual y Posibles Usos Como Materia Prima en Puerto Rico”, *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 5(1), 2001.
- [13] Khatib, Z. K. and Bayomy, F. M. “Rubberized Portland Cement Concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, August 1999, pp. 206–213.
- [14] Danko, M., Cano, E., y Pena, J., “Use of Recycled Tires as Partial Replacement of Coarse Aggregate in the Production of Concrete”, Recuperada el 16 de Mayo del 2012, Tomada de la página web <http://lin.asee.org/Conference2008/SESSIONS/Use%20of%20Recycled%20Tires%20as%20Partial%20Replacement%20of%20Coarse.pdf>.