

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

MODIFICACIÓN FISCOQUÍMICA DE LLANTAS TRITURADAS
MEDIANTE RADIACIÓN GAMMA Y SU REUSO EN EL
MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL
CONCRETO

QUE PRESENTA

M. EN I. EDUARDO SADOT HERRERA SOSA

PARA OBTENER EL GRADO DE:
DR. EN CIENCIAS AMBIENTALES

DIRIGIDA POR:
DR. CARLOS EDUARDO BARRERA DÍAZ
DR. GONZALO MARTÍNEZ BARRERA
DR. EPIFANIO CRUZ ZARAGOZA

AGOSTO DE 2015



OFICIO DE ASIGNACION DE JURADO



UAEM | Universidad Autónoma
del Estado de México

3° (EV. DE GRADO)
OFICIO NO 285/2015

Toluca, México, 10 de julio de 2015

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES
EDUARDO SADOT HERRERA SOSA
FACULTAD DE QUIMICA
P R E S E N T E

La ~~que~~ suscribe Directora de la Facultad de Química, dependiente de la Universidad Autónoma del Estado de México, comunica a Usted que el Jurado de su Evaluación de Grado estará formado por:

Dr. Carlos Eduardo Barrera Díaz
PRESIDENTE

Dra. Patricia Balderas Hernández
SECRETARIO

Dr. Gonzalo Martínez Barrera
PRIMER VOCAL

Dra. Gabriela Roa Morales
SEGUNDO VOCAL

Dr. Epifanio Cruz Zaragoza
TERCER VOCAL

Dr. Fernando Ureña Nuñez
SUPLENTE

Dr. Víctor Varela Guerrero
SUPLENTE

FIRMA

ATENTAMENTE
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO

"2015, Año del Bicentenario Luctuoso de José María Morelos y Pavón"

Guadalupe Ofelia Santamaría González
M. en A.P. GUADALUPE OFELIA SANTAMARIA GONZALEZ
DIRECTORA

c.c.p. Archivo



www.uaemex.mx

El presente trabajo se realizó en las instalaciones del Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM así como en el Laboratorio de Construcción de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, bajo la dirección del Dr. Carlos Barrera Díaz, del Dr. Gonzalo Martínez Barrera y del Dr. Epifanio Cruz Zaragoza

Este trabajo de investigación fue registrado con el título: “Modificación fisicoquímica de llantas trituradas mediante radiación Gamma y su reuso en el mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto” con número de registro DCAAM-0513 ante la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados (SIEA).

El proyecto se inscribe en la línea de Generación y Aplicación del Conocimiento (LGAC):
Prevención, Control y Efectos de la Contaminación Ambiental, del área de Calidad Ambiental del Programa de Posgrado en Ciencias Ambientales en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por todo el cariño.

A mis asesores por su guía y enseñanzas:

Al Dr Carlos Eduardo Barrera Diaz.

Al Dr Gonzalo Martínez Barrera

Al Dr Epifanio Cruz Zaragoza.

A la Dra. Patricia Balderas, al Dr. Fernando Ureña, al M. en I. Jesús Antonio Flores Bustamante y al Dr Francisco Días por su gran apoyo.

A las Instituciones que hicieron posible este trabajo:

A la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

Muy especialmente al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada y sin la cual no habría sido posible realizar la presente investigación.

A la Universidad Autónoma del Estado de México por permitirme ser parte de ella.

CONTENIDO.

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	3
1. ANTECEDENTES.....	4
1.1. Polímeros y Copolímeros.....	5
1.2 Llantas automotrices	6
1.2. Situación actual del desecho de llantas.....	9
1.3. Proceso de reciclaje de llantas	10
1.4. Concreto Hidráulico	13
1.4.1. Cemento	14
1.4.2. Agregados para el concreto	17
1.4.3. Determinación de las propiedades de resistencia mecánica del concreto	19
1.5 Concreto reforzado con partículas de llantas.....	21
1.6 Radiación Gamma.....	22
1.7 Empleo de la radiación gamma en el concreto.....	26
2. JUSTIFICACION.....	28
3. HIPOTESIS	32
4. OBJETIVOS	34
4.1. Objetivo General:	35
4.2. Objetivos Específicos:	35
5. MATERIALES Y MÉTODOS	37
5.1 . Descripción de la Metodología.....	39
5.2. Procedimiento para la elaboración de especímenes de concreto.....	41
5.2.1. Pruebas a los agregados.....	41
5.2.1.1 Granulometría y Pesos Volumétricos.	41
5.2.1.2. Pesos específicos y Absorción.....	48
5.2.2 Diseño y fabricación de concreto	56
5.2.2.1 Mezcla de prueba:.....	58
5.2.3. Ensayes mecánicos	66
5.2.3.1. Resistencia a la Compresión	66

5.2.3.2. Prueba de Módulo de Elasticidad (Carga Deformación).....	70
5.2.3.3. Resistencia a la tensión por compresión diametral	73
5.2.3.4. Resistencia a la flexión	75
5.2.3.5. Velocidad de pulso.....	75
5.3 Diseño experimental y análisis estadístico.....	76
6. RESULTADOS	77
6.1. ARTÍCULO 1. (PUBLICADO)	78
6.2. CAPÍTULO DE LIBRO (PUBLICADO).....	86
6.3. ARTÍCULO 2 (ENVIADO).....	111
7. DISCUSIÓN GENERAL	130
7.1. Elaboración de Concretos Testigo.	131
7.2 Concretos elaborados con partículas de llanta previamente irradiadas.....	134
7.2.1 Peso Volumétrico (PV).....	135
7.2.2. Resistencia a la compresión ($f'c$).....	136
7.2.3. Resistencia a la Tensión (T)	137
7.2.4. Resistencia a la flexión (fr)	138
7.2.5. Módulo de elasticidad (E)	138
7.2.6. Velocidad de Pulso (Vp)	139
7.3. Superficies de las fibras sin irradiar e irradiadas	140
7.4. Resistencia a la compresión de concretos con partículas de llanta e irradiados posteriormente.....	142
8. CONCLUSIONES	143
9. REFERENCIAS	145
ANEXO I. DISEÑO DE MEZCLAS	150
ANEXO 2. PRUEBAS MECÁNICAS DE CONCRETO.	157

Índice de Figuras

Figura 1. Disposición de llantas de desecho en México. Adaptación Instituto de Investigaciones en Materiales	9
Figura 2. Partes de una llanta	10
Figura 3. Obtención de partículas con diámetro de 1 a 17 mm	11
Figura 4. Componentes producto del reciclado de llantas.....	12
Figura 5. Curva típica esfuerzo-deformación para concreto de 350 kg/cm²	20
Figura 6. Metodología Empleada	38
Figura 7 Concretos elaborados con partículas de llanta a diferentes concentraciones	133
Figura 8. Porcentaje de pérdida o ganancia de las propiedades de los concretos con partículas de llanta de 2.80 mm a diferentes irradiaciones.	134
Figura 9. Porcentaje de pérdida o ganancia de las propiedades de los concretos con partículas de llanta de 0.85 mm a diferentes irradiaciones.	135
Figura 10. SEM Imagen de partículas de llanta a diferentes dosis de irradiación... 	141
Figura 11. Resistencia a la Compresión de Concretos Irradiados posteriormente a su fabricación con partículas de llanta de diferentes tamaños.....	142

Índice de Tablas

Tabla 1. Porcentaje de sustancias en la mezcla de goma..... 7

Tabla 2. Composición química de la llanta 8

Tabla 3. Materiales que componen los diferentes tipos de llantas..... 8

Tabla 4. Principales componentes del cemento Portland..... 15

Tabla 5. Límites de la composición del cemento..... 16

Tabla 6. Composición química y finura de los cementos tipo I, II, III, IV, V y Blanco.17

RESUMEN

Hoy en día, la industria del renovado ha tenido avances significativos en el proceso de reciclaje de llantas, logrando la separación de los tres componentes básicos: fibra textil, acero y el elastómero. Estos dos últimos tienen diversas aplicaciones en la industria de la construcción como en pavimentos, carreteras y estructuras. En general, son agregados al concreto para modificar sus propiedades.

Al agregar partículas al concreto se generan esfuerzos de tensión, dando lugar a un rápido agrietamiento y pronta falla, esto puede solucionarse si se controla los tamaños de partículas. Dentro de los pocos estudios reportados en la literatura, se señala que las partículas de elastómero pueden reducir la propagación de grietas, lo cual conduce a un aumento significativo en la resistencia a la tensión, en la ductilidad y en la capacidad de absorción de energía.

Se están buscando tecnologías alternativas, limpias e innovadoras para mejorar las propiedades del elastómero y con ello su utilización en la construcción. Una de estas, casi nunca utilizada, es el uso de radiación gamma, con la cual, en principio se puede controlar el tamaño de las partículas, aunado a la disminución de la concentración de los agregados finos en el concreto. Se esperan propiedades mecánicas mejoradas para el concreto con llanta de desecho debido a la aportación del módulo de Young del elastómero que es mucho mayor a la del cemento. Entre estas propiedades se encuentran la resistencia a la compresión y a la tensión, así como la rigidez. Estos concretos, pueden ofrecer un atractivo costo-beneficio, derivado de la adquisición de un material de desecho, además de ser un modo viable para la disminución de la contaminación.

Dada la factibilidad de dicha tecnología, se plantea como objetivo del presente proyecto de investigación, la modificación fisicoquímica de los elastómeros obtenidos de llantas de desecho y su reúso como material de refuerzo en el concreto.

En una **primera etapa** del proyecto se evaluaron las propiedades morfológicas de los elastómeros de llantas de desecho, antes y después de la irradiación, mediante Microscopia

Electrónica de Barrido (SEM); *posteriormente* se elaboraron concretos con elastómeros irradiados, a los cuales se les evaluaron propiedades morfológicas utilizando microscopía electrónica de barrido (SEM) y las propiedades mecánicas por medio de ensayos de resistencia a la compresión, tensión, flexión y se determinó el módulo de elasticidad (estático). En una *tercera etapa*, se elaboraron concretos con elastómeros y posteriormente se irradiaron a diferentes dosis, los resultados se compararon con los elaborados con el método anterior, para determinar que procedimiento es el que arroja mejores resultados en cuanto al aumento de la resistencia.

La presente investigación pretende la aportación de conocimientos en la modificación fisicoquímica de elastómeros de desecho de llantas, en la determinación de propiedades mecánicas de concretos elaborados con estos elastómeros (Resistencia a compresión y tensión, Modulo de elasticidad) y primordialmente en el reúso de los elastómeros de llantas. Con lo cual se podrá disponer de una alternativa tecnológica factible y sencilla, para reciclar y reusar llantas de desecho.

ABSTRACT

Environmental pollution caused by solid wastes are increasing in the last decades, one of this is referred to automotive tires, which are recycled by different methods; including mechanical grinding. One of the most recurrent applications is to use recycled particles as fillers in building materials, as hydraulic concrete. Nevertheless, for polymer reinforced concrete, the Young's modulus of both polymers and cement matrix is responsible of detrimental properties of concrete, including compressive and tensile strength, as well as stiffness. A novel methodology for solving such problems is based on using ionizing radiation, which has proven to be a good tool for improvement on physical and chemical properties of several materials including polymers, ceramics, and composites. In this work, particles of 0.85 mm and 2.80 mm obtained from waste automotive tire were submitted at different dosages (from 0 to 300 kGy) of gamma radiation in order to modify their physicochemical properties and then used as reinforcement in Portland cement concrete for improving mechanical properties. The results show improvement in compressive and tensile strength for concrete elaborated with irradiated tire particles.

1. ANTECEDENTES

1.1. Polímeros y Copolímeros

Los polímeros se producen por la unión de cientos de miles de monómeros que forman enormes cadenas. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases: a) Fuerzas de Van der Waals, son de dispersión y están asociadas a las moléculas de muy baja polaridad; en general se forman dipolos no permanentes, que producen atracciones electrostáticas muy débiles en las moléculas de tamaño normal, pero en los polímeros las fuerzas de atracción se multiplican y llegan a ser enormes (2,4 Kcal/mol); b) fuerzas de Atracción dipolo-dipolo, son más energéticas, a ellas se debe la gran resistencia en tensión de las fibras de los poliésteres (3 a 5 Kcal/mol); c) enlaces de Hidrógeno, estas interacciones son tan fuertes, que fibras de poliamidas (nylon) tiene resistencia a la tensión mayor que la de una fibra de acero de igual masa (5 a 12 Kcal/mol); d) Ionómeros, son atracciones de tipo iónico, son las más intensas (> 100 Kcal/mol) (Brown y Lemay, 2004).

La variación en la composición química y en la estructura molecular de los polímeros es el resultado de la presencia de grupos finales, ramas, variaciones en la orientación de unidades monoméricas y la irregularidad en el orden en el que se suceden los diferentes tipos de esas unidades.

Los copolímeros contienen varias unidades estructurales llamadas monómeros cuyas diferentes características son las responsables de sus propiedades; por ejemplo: a) Los copolímeros estireno-butadieno son los hules sintéticos que han sustituido prácticamente en su totalidad al hule natural, Los hules sintéticos contienen un 25% de estireno y un 75% de butadieno; sus aplicaciones incluyen en orden de importancia: Llantas, espumas, empaques, suelas para zapatos y mangueras; b) El terpolímero acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), es un material formado por una fase homogénea rígida formada por el estireno y el acrilonitrilo, y por una fase elastomérica correspondiente al polibutadieno. El acrilonitrilo aporta la resistencia química, el estireno la rigidez y el butadieno la flexibilidad. Al variar las proporciones de los monómeros, las propiedades de los copolímeros varían, esto sucede también al variar su posición dentro de las cadenas.

Como se menciona, la flexibilidad la proporciona el elastómero. En términos generales, los elastómeros pueden sufrir grandes deformaciones sin ruptura, y volver a su estado original cuando se suprime la fuerza aplicada. Este comportamiento elástico es una consecuencia del estado desordenado de las cadenas poliméricas. El entrecruzamiento en los elastómeros no es tan denso como en los polímeros termoestables y presentan una elevada movilidad de cadenas por encima de su temperatura vítrea (T_g). A bajas temperaturas el comportamiento elástico no se produce y en vez de tener un material tenaz, flexible y altamente deformable, se tiene un material rígido, quebradizo y fácil de fracturar (Estado vítreo) (Marton, 1969)

1.2 Llantas automotrices

En épocas prehispánicas, los pobladores de América central y del Sur utilizaban látex líquido que brotaba del árbol, el cual secaban y hervían en agua hasta formar una masa blanda y gomosa con la que hacían pelotas. Esta goma era dura, elástica y podía cortarse, mientras estuviera seca; pero no podía ser extendida sobre objetos.

Durante el siglo XVIII se encontró que era mejor usar el látex natural, ya que se podía extender con facilidad y al secarse dejaba una capa de goma pura, fuerte, flexible e impermeable. Tiempo después, se descubrió que un compuesto de hidrocarburos podía disolver la goma solidificada, la que al regresar a su estado sólido, podía ser amasada y machacada más fácilmente que la original. Fue en el siglo XIX cuando se descubrió que al mezclar la goma con azufre y ser calentada, esta endurecía y tomaba la calidad del cuero, sin disolverse con tanta facilidad con petróleo ni con otras soluciones, además de ser resistente al calor, a dicho proceso se le llamó vulcanización.

La fabricación de llantas automotrices se divide en tres etapas: a) En la primera, se elabora un modelo por computadora, que contiene el talón, el cinturón y la carcasa de la llanta. Posteriormente, se determina el proceso de fabricación, los materiales y las cantidades a emplear; b) Durante la segunda etapa, se elige la mezcla y el dibujo de la banda de rodadura, para fabricar llantas con cortes a mano. Los cuales son examinados en laboratorio y sometidos a pruebas de resistencia mecánica, térmica (desde -40°C hasta 50°C) y química; c) La tercera etapa es la fabricación en serie y consta de tres partes.

Primera parte: denominada Mezcla de gomas (Tabla 1), en esta el hule se mezcla con emulgentes y el negro de humo, para llevar a cabo la polimerización. El negro de humo es fabricado a partir de aceite y gas quemado. El aceite ayuda en la adherencia y hace que la mezcla sea blanda. En la fase de vulcanización, el azufre procura que las cadenas de moléculas de hule formen redes, para después obtener goma elástica.

Tabla 1. Porcentaje de sustancias en la mezcla de goma (Adaptada de Fabricación de Neumáticos, CONAE)

Sustancias	%
Hule	48
Negro de humo	25
Aceite	12
Productos Químicos	4
Azufre	1
Otros	10

Segunda etapa: Mediante el uso de acero y fibras sintéticas, se obtiene la carcasa, los núcleos de talón y las capas del cinturón radial. En el caso de la carcasa se cablean las fibras textiles artificiales, normalmente de rayón y se transforma en un cordón que junto con el acero se colocan a cierto ángulo. Posteriormente se recubren los cables con hule, se añade el cinturón de acero y más tarde se coloca la banda continua.

Tercera etapa: denominada de vulcanización, en la cual la llanta obtiene su aspecto definitivo; consiste en aplicar una temperatura entre 150 y 170°C a alta presión, haciendo que las cadenas de hule sean reticuladas. Finalmente, la llanta en bruto se prensa en moldes, aplicando presión de vapor o gas inerte (nitrógeno) de 12 hasta 24 atmósferas, para poder grabar el dibujo de la llanta durante un tiempo de 10 a 12 minutos.

Los diferentes tipos de llantas se diferencian por el porcentaje de los elementos químicos y los materiales que las constituyen (Tablas 2 y 3).

Tabla 2. Composición química de la llanta (adaptado de Materiales y compuestos para la industria del neumático; Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A. Ing. Guillermo Castro, diciembre 2008).

Elemento	Composición
	%
Carbono, C	70
Fierro, Fe	15
Hidrógeno, H	7
Dióxido de Silicio, SiO ₂	5
Óxido de Zinc, ZnO	2
Azufre, S	1-3
Cloro, Cl	0.2-0.6
	(ppm)
Plomo, Pb	60-760
Níquel, Ni	77
Cadmio, Cd	5-10
Cromo, Cr	9-7
Talio, Tl	0.2-0.3

Tabla 3. Materiales que componen los diferentes tipos de llantas.

Tipo de llanta	Hule estireno- butadieno (SBR) (%)	Hule Natural (NR) (%)	Alambres de acero “armónico” (%)	Fibras textiles (%)
Automóvil	70	-	15	15
Camiones de transporte	-	70	29	1
Maquinaria para excavación	70	-	15	15
Maquinaria agrícola	-	70	5	25

Los copolímeros estireno-butadieno (S-B) son los hules sintéticos que han sustituido prácticamente en su totalidad al hule natural, su composición más común es de 25% de

estireno y 75% de butadieno; sus aplicaciones incluyen en orden de importancia: Llantas, espumas, empaques, suelas para zapatos y mangueras.

1.2. Situación actual del desecho de llantas

Mientras países europeos como Alemania, Francia, Austria reciclan hasta el 60% de sus llantas usadas, en México prácticamente no existe tal reciclado, debido a la escasa conciencia ambiental y a un inexistente sistema de control. De los aproximadamente 30 millones de llantas que se desechan anualmente en México, el 91% terminan en lotes baldíos, ríos y carreteras (Figura 1). Dicha situación no solo arruina paisajes sino que convierten a estos lugares en criaderos de mosquitos, ratas, moscas y cucarachas que son propagadores de enfermedades tales como el dengue y la rabia entre otras; además de ser sitios propensos a la generación de incendios, difíciles de controlar. Varios estudios han demostrado que la quema de llantas libera sustancias de máxima peligrosidad para el ser humano, tales como monóxido de carbono, furanos, tolueno, benceno y óxido de plomo (US Environmental Protection Agency, 1997).

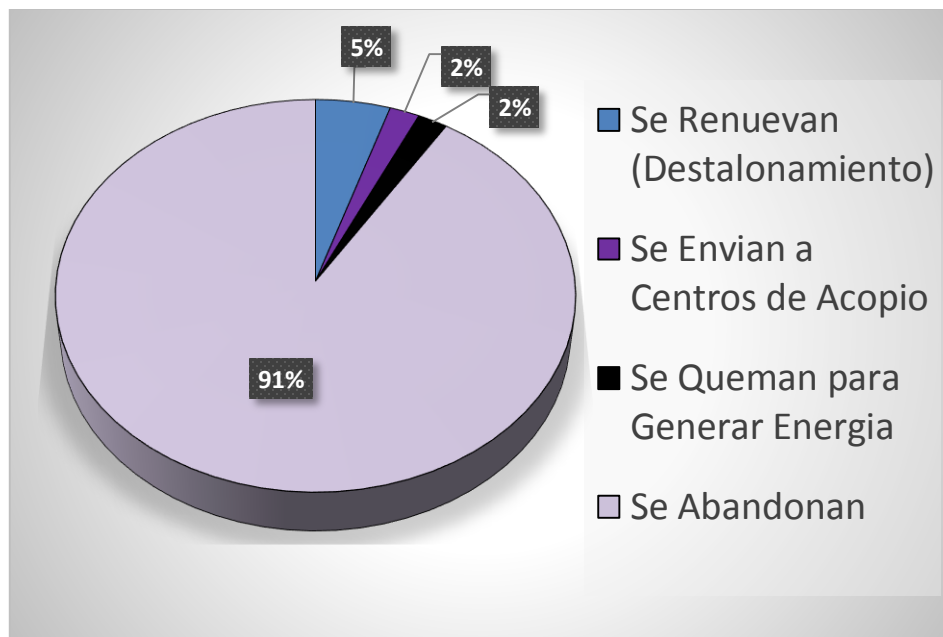


Figura 1. Disposición de llantas de desecho en México. Adaptación Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM-UNAM, 2012).

1.3. Proceso de reciclaje de llantas

El reciclaje, se define como la obtención de materiales a partir de desechos, mediante el uso de procesos fisicoquímicos o mecánicos, donde se somete un producto ya utilizado, a un tratamiento total o parcial para obtener una materia prima diferente o un nuevo producto, introduciéndolo de nuevo en el ciclo de vida útil. Las tecnologías para el reciclaje se implementan ante la perspectiva del agotamiento de recursos naturales en un sentido macro económico y para eliminar de forma eficaz los desechos (Porter, 2002).

El reciclaje se inscribe en la estrategia de tratamiento de residuos de las “Tres R”:

- Reducir: acciones para disminuir la producción de objetos susceptibles de convertirse en residuos.
- Reutilizar: acciones que permiten el volver a usar un producto para darle una segunda vida, con el mismo uso u otro diferente.
- Reciclar: el conjunto de operaciones de recogida y tratamiento de residuos que permiten reintroducirlos en un ciclo de vida (Greenpeace, 2011).

Ya que las llantas están compuestas por tres materiales: alambres de acero ‘armónico’, elastómeros, y fibras textiles, estos pueden ser reutilizados en procesos productivos una vez que se termina el periodo de vida de la llanta.

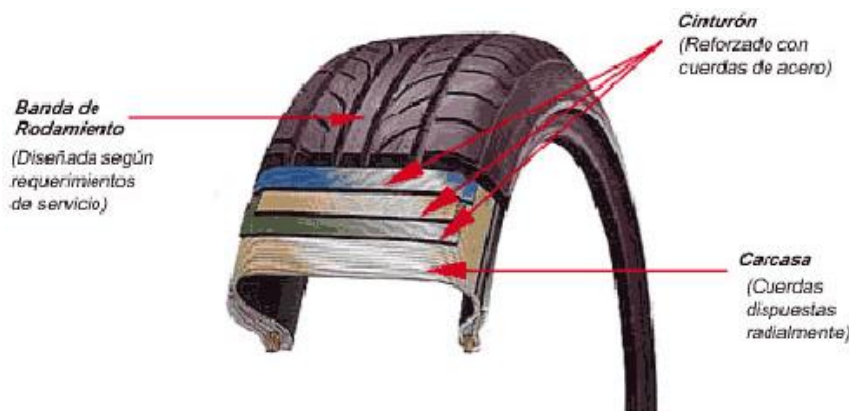


Figura 2. Partes de una llanta

Para reciclar dichos materiales es necesario que estas se sometan a los siguientes procesos o fases:

- a) Destalonamiento: es la remoción de los alambres de acero “armónico”
- b) Trituración: es la reducción volumétrica de la llanta entera a trozos más pequeños; esta operación está compuesta por dos fases: la trituración primaria y la trituración secundaria. En la trituración primaria se logran obtener grandes trozos de llantas de tamaño no uniforme. Mientras que en la trituración secundaria se reducen los trozos en pedazos aún más pequeños, que varían entre 20 y 100 mm.
- c) Granulación primaria: es la reducción volumétrica de los trozos de llantas en granos, provenientes de las fases de trituración. Se obtienen tamaños de 20 mm.

Por motivos de eficiencia, el material no debe entrar en un granulador si primero no ha sido reducido con el triturador a un tamaño de 20mm. Si el material granulado (granos de tamaño hasta de 20mm) no contiene material textil, se separan por tamaños en una criba con tres diferentes orificios (diámetros de 1 a 17mm) (Figura 3). Entre más pequeño y puro se logre obtener el grano, mayor será su valor en el mercado.



Granuladores secundarios



Criba rotativa

Figura 3. Obtención de partículas con diámetro de 1 a 17 mm

- d) Granulación secundaria: Si el material granulado contiene material textil, será conducido a una sucesiva fase de granulación para separar la tela de la goma, esta fase se llama granulación secundaria o de 'refinación'. Una vez molidos los granos se separan con una criba de tres diferentes tamaños, dependiendo del tamaño de que se requiera obtener y de los tamaños de criba utilizada, estos oscilan entre 0.5 a 3 mm.
- e) Desmetalizado (separación magnética del acero 'armónico'): se emplea para remover las partículas ferromagnéticas de los demás materiales. Se remueve el 99% del acero "armónico" por medio de un separador magnético.
- f) Durante el proceso de granulado se produce una fracción de polvo de tela y de elastómero, así que por motivos vinculados al ambiente, estas pequeñas partículas deben ser aspiradas por medio de un sistema de aspiración de polvos formado por: el ciclón reductor de polvos, electroaspirador, rotoválvulas, 'filtro de mangas y las respectivas tubaciones. Al final se logra la separación de las llantas en cuatro componentes (Figura 4).



Figura 4. Componentes producto del reciclado de llantas.

Otra alternativa para el tratamiento de llantas de desecho es la pirólisis, que consiste en la descomposición térmica de las cadenas poliméricas en ausencia de oxígeno; en el caso de las llantas de desecho, primero se lleva a cabo la trituración y posteriormente se introducen las partículas de elastómero en hornos con temperaturas entre 600 y 800°C en ausencia de oxígeno, esto con el fin de descomponerlos y obtener productos de menor peso molecular (líquidos, gases y carbón residual). Estos productos pueden ser útiles como combustibles o materias primas para otros procesos (Yang y Roy, 1993).

1.4. Concreto Hidráulico

El concreto es la mezcla de agregados finos y gruesos con una pasta cementante compuesta de cemento Portland y agua, que al fraguar forman una masa monolítica semejante a la roca. La pasta se endurece debido a la reacción química entre el agua y el cemento Portland, generando productos de hidratación.

Los agregados finos son arenas naturales o sintéticas con tamaños máximos de hasta 10 mm y los agregados gruesos son rocas o gravas con tamaños máximos de hasta 152 mm. Ambos agregados constituyen entre el 60 y 75% del volumen total de la mezcla, por lo tanto pueden limitar las propiedades del concreto e influir en su desempeño. Sin embargo, estas propiedades dependen mayormente de la calidad de la pasta formada por el agua y el cemento, así como de la afinidad que tengan con los agregados y su capacidad de trabajar en conjunto (Kosmatka, 1992).

Una de las mayores propiedades del concreto recién mezclado, es ser plástico, semifluido y poder adquirir prácticamente cualquier forma por medio de moldes. Durante su estado fresco, puede fluir como un líquido viscoso en el que hay muy poco o ningún contacto entre los agregados, característica que prevalece aun en el concreto ya endurecido.

Inmediatamente después del mezclado de los materiales, la reacción química que se genera propicia el paulatino endurecimiento del concreto, lo que incrementa su resistencia con la edad, siempre y cuando se presente una humedad y temperatura favorable para la hidratación del cemento (Neville, 1998).

Una propiedad física fundamental y tal vez la más importante del concreto en estado endurecido, es su resistencia a la compresión (carga máxima que puede soportar por unidad de área). Este índice es utilizado en el cálculo, diseño y elaboración de las mezclas que se emplearán para fabricar elementos que formarán parte de las estructuras.

Además puede ser utilizada para estimar la resistencia a otros esfuerzos como la flexión, torsión y cortante, ya que estos guardan una correlación establecida empíricamente para el análisis estructural y que depende directamente de la calidad y características de los componentes del concreto, así como de las condiciones ambientales durante su tiempo de vida.

Dentro de los principales factores que determinan la resistencia se encuentran: la edad del concreto, la relación agua-cemento de la mezcla, el grado de compactación de los agregados en el concreto, la porosidad y el contenido de aire atrapado al momento de fabricar el concreto. Otras variables que intervienen en el cálculo de la resistencia son la relación agregado-cemento, la calidad del agregado (granulometría, textura superficial, forma, resistencia, rigidez y el tamaño nominal) (Kosmatka, 1992).

1.4.1. Cemento

El cemento Portland es obtenido de la mezcla de materiales calcáreos (piedra caliza o yeso), sílice, alúmina y óxido de hierro. El proceso consiste en la trituración de todas las materias primas hasta obtener polvos muy finos, los cuales se mezclan hasta su completa homogeneización y se queman en un gran horno rotatorio a 1400°C, donde se producen las reacciones químicas que subdividen y aglutinan al material en fragmentos no mayores a 6 cm, estos fragmentos se vuelven de forma regular por efecto de la rotación del horno, logrando la obtención de escoria llamada clinker Portland.

Una vez que se enfría el clinker, se muele conjuntamente con una pequeña proporción de yeso, el producto resultante de este proceso es un polvo fino de color gris que se conoce como cemento Portland. Durante la molienda, el clinker puede ser combinado con escorias

o materiales puzolánicos o bien con materiales sulfo-calcio-aluminosos para la obtención de cementos puzolánicos o de cementos expansivos respectivamente (Neville, 1998).

Los principales componentes químicos del cemento Portland se mencionan en la Tabla 2.

Tabla 4. Principales componentes del cemento Portland (Neville, 1998).

Nombre del componente	Composición oxidada	Abreviatura
Silicato de tricálcio	3CaO-SiO ₂	C ₃ S
Silicato de dicálcio	2CaO-SiO ₂	C ₂ S
Aluminio de tricálcio	3CaO-Al ₂ O ₃	C ₃ A
Aluminoferrato	4CaO- Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₃ S

Los silicatos tricálcico (C₃S) y dicálcico (C₂S) son los causantes de la resistencia de la pasta del cemento, ya que al hidratarse forman silicatos hidratados de calcio (S-H-C) además de constituir aproximadamente el 75% del peso del cemento (Kosmatka, 1992).

El silicato tricálcico (C₃S) aporta la resistencia a corto plazo mientras que el silicato dicálcico (C₂S) aporta la resistencia a mediano y a largo plazo.

El aluminato tricálcico (C₃A) es el compuesto con mayor rapidez de hidratación pero con menor contribución a la resistencia, excepto en las primeras etapas, ya que propicia una mayor velocidad en el fraguado pero su presencia hace al concreto susceptible al ataque de los sulfatos, debido a la formación de sulfo-aluminatos que genera resquebrajamiento. Aun así es necesario para propiciar la mezcla de sílice y cal durante la fabricación del clinker.

El aluminoferritotetracálcico (C₄AF) se requiere para la formación de sulfo-ferrita de calcio cuando reacciona con el yeso, su presencia es útil como fundente durante la calcinación del clinker y favorece a la hidratación de los demás componentes.

En la composición química del clinker se presentan los álcalis: óxidos de sodio (Na₂O) y de potasio (K₂O) cuyo contenido debe ser limitado y controlado para evitar la desintegración

del concreto. Otros compuestos que representan un porcentaje mucho menor son los óxidos de: magnesio (MgO), manganeso (Mn_2O_3), dipotasio (K_2O), sodio (Na_2O) y el dióxido de titanio (TiO_2), como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 5. Límites de la composición del cemento (Neville, 1998).

Óxido	Contenido (%)
CaO	60 – 67
SiO ₂	17 – 25
Al ₂ O ₃	3 - 8
Fe ₂ O ₃	0.5 - 6.0
MgO	0.1 - 4.0
Alcalinos	0.2 – 1.3
SO ₃	1 - 3

Las propiedades físicas más estudiadas son: la finura, el tiempo de fraguado, el falso fraguado, el peso específico, y el calor de hidratación.

La finura hace referencia a la masa retenida en la malla número 325 y está definida por unidad de área entre unidad de masa (m^2/kg). El tiempo de fraguado determina si la pasta de cemento fragua dentro de los límites de tiempo establecidos. El falso fraguado establece el endurecimiento de la pasta debido a la pérdida de plasticidad inmediatamente después de haber sido mezclada, sin que esto implique que haya alcanzado una total solidificación o su dureza total. El peso específico varía en un intervalo de 2.9 a 3.15 kg/dm^3 (Kosmatka, 1992) dependiendo del tipo de cemento. Mientras que el calor de hidratación es el que se genera cuando se da la reacción química entre el cemento y el agua. Depende de la relación agua/cemento.

Por medio de difracción de rayos X (XRD) se pueden determinar la composición química de los diferentes tipos de cemento y de la cantidad de los componentes. En la Tabla 4 se muestran las características de los tipos de cementos definidos por la American Standard of Testing Materials (ASTM-C-150).

Tabla 6. Composición química y finura de los cementos tipo I, II, III, IV, V y Blanco.

Cemento Portland	Composición química (%)						Pérdida por ignición (%)	Residuo insoluble (%)	Composición potencial de los compuestos (%)				Finura Blaine (m ² /kg)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃			C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
Tipo I	20.9	5.2	2.3	64.4	2.8	2.9	1.0	0.2	55	19	10	7	370
Tipo II	21.7	4.7	6.3	63.6	2.9	2.4	0.8	0.4	51	24	6	11	370
Tipo III	21.3	5.1	2.3	64.9	3.0	3.1	0.8	0.2	56	19	10	7	540
Tipo IV	24.3	4.3	4.1	62.3	1.8	1.9	0.9	0.2	28	49	4	12	380
Tipo V	25.0	3.4	2.8	64.4	1.9	1.6	0.9	0.2	38	43	4	9	380
Blanco	24.5	5.9	0.6	65.0	1.1	1.8	0.9	0.2	33	46	14	2	490

1.4.2. Agregados para el concreto

Los materiales agregados, gruesos y finos, constituyen entre el 60 y 75% del volumen (o entre el 75 y 85% del peso) total de la mezcla de concreto. Los agregados pueden ser naturales o triturados. Los naturales, como la grava o la arena se excavan de alguna mina o cantera. Mientras que agregados triturados se producen mediante la trituración de rocas de cantera, piedras tipo bola, guijarros o grava de gran tamaño.

Las rocas se clasifican en: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Las *rocas ígneas* contienen feldespatos (50%), cuarzo (30 a 40%) y mica (10 a 20%). Mientras que las *rocas sedimentarias* carbonato de calcio y magnesio. Las *rocas metamórficas* se forman por la transformación de las rocas ígneas y sedimentarias bajo la acción de la temperatura y presión.

Los áridos son arenas o gravillas procedentes de rocas naturales o artificiales. Los áridos se clasifican en: áridos rodados, áridos de machaqueo, áridos artificiales y áridos especiales. Los *áridos artificiales* más usados en la construcción son escorias de alto horno con expansión baja, escorias de hulla, las cenizas aglomeradas, restos de tejas y ladrillos, arcillas y esquistos expandidos como la perlita y la vermiculita, las virutas y las fibras. Los *áridos especiales* son áridos pesados como la barita, la magnetita, la limonita, la hematita, el hierro, se utilizan para fabricar concreto para blindaje anti-radiación.

Los agregados deben cumplir con determinados requisitos para que su empleo sea permitido en la fabricación de concreto. Las partículas deben ser durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos, arcilla y otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia con la pasta de cemento (Neville, 1998).

Las características de los agregados son: la granulometría; forma y textura de las partículas; masa volumétrica y vacíos; masa específica; resistencia al desgaste y al agrietamiento; resistencia y contracción.

Granulometría: determina la distribución de los tamaños de las partículas del agregado ya sea grueso o fino. Un buen concreto debe tener la mínima cantidad de vacíos. Las condiciones que establece la ASTM para tener una buena granulometría en el agregado fino son (Kosmatka, 1992): a) no contener más del 45% retenido entre dos mallas consecutivas, y b) el módulo de finura debe localizarse en $2.3 < f < 3.1$.

Forma y textura de las partículas: Las partículas elongadas angulares y de textura rugosa necesitan más agua que los agregados compactos, redondeados y lisos. Las partículas angulares necesitan un mayor contenido de cemento para mantener la misma relación agua-cemento. Los vacíos entre las partículas de los agregados varían según la textura, tamaño y forma de los agregados y aumentarán en agregados muy angulares. A medida que aumentan los vacíos entre las partículas, aumenta la demanda de agua y cemento o mortero que llenará los vacíos.

Masa volumétrica y vacíos. La masa volumétrica, es el peso del agregado que se requiere para llenar un recipiente con un volumen unitario específico. El valor de la masa volumétrica varía entre 1200 y 1760 kg/m³. El contenido de vacíos varía entre 30 y 45% para el agregado grueso, y 40 a 50% para el agregado fino (Kosmatka, 1992).

Masa específica. La masa específica o densidad relativa es la relación entre la masa del agregado respecto a la masa de un volumen absoluto igual de agua desplazada por inmersión. Este valor varía entre 2.4 y 2.9.

Resistencia al desgaste y al agrietamiento. Esta propiedad se utiliza como índice de la calidad del agregado. Una resistencia baja al desgaste en los agregados puede incrementar la cantidad de material fino y en consecuencia aumentar la demanda de agua en la mezcla.

Resistencia y contracción. Esta propiedad depende de la compresibilidad, módulo de elasticidad y la humedad de los agregados. Los agregados que tienen un alto índice de absorción tienen un nivel de contracción muy elevado al secarse. Los agregados con cuarzo y feldespatos y las calizas como las dolomitas y los granitos tienen contracción baja. La arenisca, el esquisto y pizarra tienen una capacidad de contracción elevada.

1.4.3. Determinación de las propiedades de resistencia mecánica del concreto

- La resistencia del concreto a compresión se realiza de acuerdo con la norma ASTM C 39/C 39M-01, ensayando los cilindros en una máquina de compresión. La relación entre el diámetro del cilindro y el tamaño máximo del agregado debe ser igual o menor a tres (ASTM C 192-76).
- La resistencia a la flexión se mide mediante la aplicación de cargas a vigas de concreto de 150 x 150 mm de sección transversal y con un claro de tres veces el espesor como mínimo; de acuerdo a las normas ASTM C78 (carga en los puntos tercios) o ASTM C293 (carga en el punto medio). El módulo de Rotura es aproximadamente entre el 10 y el 20% de la resistencia a compresión, esto depende del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado.
- La resistencia a tensión: El concreto se caracteriza por tener una excelente resistencia a la compresión, sin embargo su capacidad a la tensión es tan baja que se le desprecia para propósitos estructurales. (norma ASTM C-496 o su equivalente NMX-C-163). La llamada prueba indirecta, o de tensión por compresión diametral, consiste en ensayar un espécimen cilíndrico en posición horizontal, sometiénolo a la acción de dos fuerzas opuestas de

compresión uniformemente distribuidas (dos placas rígidas paralelas), es decir se somete a una condición de carga a compresión diametral.

- El módulo de elasticidad aporta una explicación del comportamiento del material en las estructuras y de las deformaciones que estas sufrirán durante su vida útil o durante eventualidades (cargas accidentales, sismo, viento, etc.). El módulo de elasticidad se mide directamente en muestras de concreto ensayados a compresión mediante el registro de la curva esfuerzo-deformación (Figura 5).

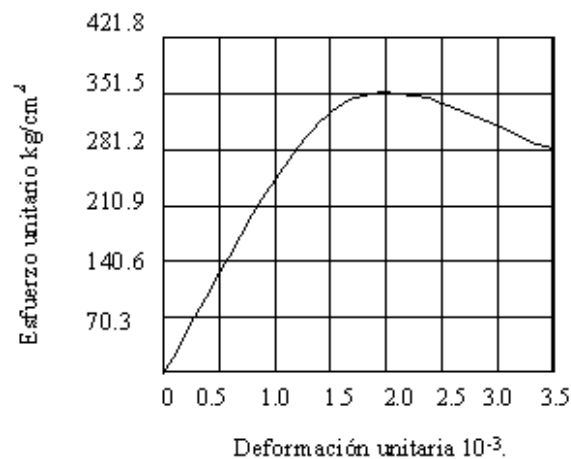


Figura 5. Curva típica esfuerzo-deformación para concreto de 350 kg/cm^2 (Neville, 1998).

El módulo secante se usa para definir la deformabilidad de un concreto dado. La ASTM C 469 – 94 recomienda la pendiente de la línea que une los puntos de la curva correspondiente a una deformación unitaria de 0.00005 y al 40% de la carga máxima.

- Módulo de Elasticidad Dinámico: Se ha tenido mucho éxito con la determinación de la velocidad de ondas longitudinales en el concreto. Un cambio en la densidad del concreto da como resultado un cambio de la velocidad de pulso. Así pues un descenso en la densidad causado por un incremento en la relación agua-cemento debe disminuir tanto la resistencia a la compresión como la velocidad de un pulso a través de éste. Se determina la velocidad de la propagación de un pulso de energía vibratoria a través del concreto (ASTM C 597).

1.5 Concreto reforzado con partículas de llantas

Las partículas de refuerzo en concreto generan esfuerzos de tensión cuando es sometido a una fuerza aplicada, lo que da lugar a un rápido agrietamiento y falla inmediata. No obstante, estudios reportados en la literatura señalan que las partículas de llanta pueden mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Las partículas obtenidas de llantas provienen de procesos de rallado, picado y molido. Se deben tener en cuenta las propiedades de las partículas de llanta, así como las de los componentes del concreto. Las propiedades mecánicas del concreto con partículas de llanta dependen de: a) la concentración de partículas, y b) del tamaño de partícula.

Cuando se incrementa la concentración de partículas de llanta disminuye la resistencia a la compresión y a la tensión, así como la rigidez. La pérdida de resistencia puede ser hasta del 80% ya que las partículas de llanta no sólo actúan como concentradores de esfuerzo, sino que también son responsables de degenerar esfuerzos de tensión dentro de la matriz del concreto, que dan lugar a un rápido agrietamiento y falla inmediata (El-Dieb, 2001; Eldin, 1993). Por otro lado, las partículas de llanta tienen un efecto limitado sobre la propagación de grietas, que conduce a un aumento significativo de la resistencia a tensión, ductilidad y capacidad de absorción de energía (Taha, 2008; El-Dieb, 2001).

Otra ventaja de las partículas de llanta es la absorción de sonido; más aún se está trabajando en la capacidad de absorción de energía de las partículas en beneficio de la elasticidad del concreto. Sin embargo, debido a las diferencias del módulo de Young tanto de las partículas como de la matriz de concreto, se tendrían que someter los concretos a grandes deformaciones, lo que causaría disminución progresiva en las propiedades mecánicas.

Por otro lado, existen estudios que indican que un factor importante en la disminución de la resistencia es el tamaño de partícula, en algunos se dice que al agregar partículas más grandes, se presentaron resistencias más bajas, en comparación a concretos elaborados con partículas más finas de reciclado de llanta (Khatib, 1999; Topcu, 1995), sin embargo, existen estudios que afirman lo contrario, es decir, que partículas más finas dentro de la mezcla de concreto, propician una menor resistencia mecánica (Ali, 1993; Fattuhi, 1996).

Cabe señalar, que estudios indican que un factor preponderante en las propiedades mecánicas de estos materiales compuestos, es la rugosidad que presentan las partículas en su superficie, ya que de este dependerá la adherencia con la matriz de cemento dentro del concreto, es por ello que al aumentar esta característica se pueden obtener valores más altos de resistencia evitando así una caída drástica de las propiedades mecánicas, para ello se propusieron tratamientos a las partículas de llanta previo a su inclusión dentro de la mezcla de concreto, dichos pretratamientos, iban desde lavar las partículas con agua para librarlas de contaminantes, hasta u lavarlas con algunos ácidos u otros agentes (Naik, 1991) con el fin de incrementar la textura en la superficie del material reciclado de llanta lo permitió que la disminución de la resistencia no fuera tan grande, aun así, los resultados siguieron mostrando una baja en la resistencia de estos concretos en relación a los concretos normales (Eldin, 1993; Rostami, 1993)

1.6 Radiación Gamma

La radiación gamma (γ) es un tipo de radiación electromagnética de alta energía formada por fotones y producida generalmente por elementos radiactivos o procesos subatómicos como la aniquilación de un par positrón-electrón. Este tipo de radiación ionizante , con fotones energéticos de 1.173 y 1.332 MeV, puede producirse del material radiactivo Cobalto-60 y es capaz de penetrar en la materia más profundamente que la radiación alfa o beta (Reichmanis, 1993).

Cuando se somete un material polimérico a radiación ionizante, se producen efectos físicos y químicos que están en función de la naturaleza de los polímeros, así como de la dosis de la radiación. La ventaja de trabajar con este tipo de macromoléculas, es la gran sensibilidad a cambios en los enlaces químicos, obteniéndose propiedades diferentes en cuanto a cristalinidad, densidad, coeficiente de expansión térmica, módulo de elasticidad, permeabilidad, así como en la resistencia a la corrosión, a la abrasión y a disolventes.

La fuerza total de atracción entre las moléculas de un polímero depende del número de las interacciones. Como máximo, sería igual a la energía de enlace multiplicada por el número de átomos de carbono (C) en el caso del polietileno o por el número de carbonilos (C=O)

en los poliésteres, etc. Rara vez se alcanza este valor máximo ya que las cadenas, por lo general, no pueden acomodarse con la perfección requerida.

Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases: a) Fuerzas de Van der Waals, son de dispersión y están asociadas a las moléculas de muy baja polaridad; en general se forman dipolos no permanentes, que producen atracciones electrostáticas muy débiles en las moléculas de tamaño normal, pero en los polímeros las fuerzas de atracción se multiplican y llegan a ser enormes (2,4 Kcal/mol); b) fuerzas de Atracción dipolo-dipolo, son más energéticas, a ellas se debe la gran resistencia en tensión de las fibras de los poliésteres (3 a 5 Kcal/mol); c) enlaces de Hidrógeno, estas interacciones son tan fuertes, que fibras de poliamidas (nylon) tiene resistencia a la tensión mayor que la de una fibra de acero de igual masa (5 a 12 Kcal/mol); d) Ionómeros, son atracciones de tipo iónico, son las más intensas (>100 Kcal/mol) (Brown, 2004).

La variación en la composición química y en la estructura molecular de los polímeros es el resultado de la presencia de grupos finales, ramas, variaciones en la orientación de unidades monoméricas y la irregularidad en el orden en el que se suceden los diferentes tipos de esas unidades.

Con la radiación gamma es posible modificar la estructura química de las partículas o fibras poliméricas a través de tres procesos: escisión o rompimiento de cadenas (*scission*), entrecruzamiento (*cross-linking*) e injerto (*grafting*). Estos mecanismos contribuyen, en mayor o menor medida, a modificar el comportamiento mecánico de los polímeros. La influencia de cada proceso depende de la cantidad de energía absorbida por unidad de masa (dosis), de la concentración, de la dispersión, de la atmósfera (inerte o aire) y la temperatura a la cual se realiza la irradiación, así como del post-tratamiento (Martínez, 2010).

Los efectos de la irradiación gamma en polímeros suelen evaluarse a través de los cambios en la estructura química (con el análisis de la distribución de pesos moleculares) y en el comportamiento mecánico. Estos cambios que son debidos a la formación de enlaces, rotura de cadenas, desprendimiento de radicales que integran las unidades monoméricas

y la oxidación entre otros, permiten incrementar el grado de polimerización o el reticulado de la estructura ya que generan una reordenación geométrica de la estructura del polímero (Povol, 2000).

La radiación gamma modifica la estructura polimérica a través de la formación de una variedad de grupos funcionales como carbonilos, carboxilos, ésteres e hidroxilos, induciendo frecuente y simultáneamente, tanto la ruptura de las cadenas hidrocarbonadas como su entrecruzamiento, lo que se traduce en cambios en la resistencia mecánica, transparencia, capacidad aislante y repelencia al agua, por ejemplo. Un efecto importante promovido por la radiación, es la variación en la masa molecular, la cual proporciona información sobre la fase cristalina del polímero (Buttafava, *et al.*, 2005).

Los elastómeros son muy susceptibles a la acción de la radiación, la mayoría de ellos se entrecruzan. En términos generales, los elastómeros pueden sufrir grandes deformaciones sin ruptura, y volver a su estado original cuando se suprime la fuerza aplicada. Este comportamiento elástico es una consecuencia del estado desordenado de las cadenas poliméricas. El entrecruzamiento en los elastómeros no es tan denso como en los polímeros termoestables y presentan una elevada movilidad de cadenas por encima de su temperatura vítrea (T_g). A bajas temperaturas el comportamiento elástico no se produce y en vez de tener un material tenaz, flexible y altamente deformable, se tiene un material rígido, quebradizo y fácil de fracturar (Estado vítreo) (Marton, 1969).

Los elastómeros disminuyen los valores en sus propiedades elásticas a dosis del orden de 10,000 kGy. Este efecto es más pronunciado si la radiación se lleva a cabo en presencia de oxígeno, dado que la mayoría de los elastómeros son muy sensibles al "envejecimiento oxidativo". Los agentes protectores más eficientes son los antioxidantes, los cuales previenen la degradación oxidativa a través de su interacción con los radicales libres producto de las reacciones del polímero ante la radiación, no permitiendo que estos se oxiden al reaccionar con el oxígeno (Chapiro, 1962).

Dentro de las posibles aplicaciones de este fenómeno, tenemos la vulcanización del caucho debido a la radiación que ha sido reportado en varios estudios y que presenta algunos beneficios en comparación con vulcanización química convencional (Makuuchi,

1990), en la vulcanización por radiación en forma húmeda el proceso es más controlado, preciso, rápido, versátil, es más transparente y suave, consume menos energía, el curado es a temperatura ambiente, se puede controlar y presenta una reticulación uniforme y ajustable, finalmente, no genera residuos. Este proceso en forma seca, tiene la ventaja de tener mayor estabilidad, menor degradación y mejores propiedades mecánicas, (Chaudhari, 2005).

La Vulcanización de caucho natural por medio de la radiación ha sido estudiada en su forma pura así como en presencia de aditivos (Haque , 1996; Jayasuriya , 2001; Sabharwal, 1998), que han permitido una mejor comprensión de los efectos de la radiación en el elastómero así como los efectos del secado de las partículas curadas después de la radiación (Qiao, 2002), con ello, se han podido explorar las aplicaciones potenciales de la modificación de plásticos por medio de la radiación (Liu, 2002).

En algunos estudios, se han reportado los efectos de la radiación en cauchos sintéticos como el Polibutadieno (BR) ya que es ampliamente utilizado en diversas aplicaciones (Perera, 2004). En muchas de estas publicaciones se han estudiado los cambios en el polibutadieno o sus mezclas, así como coagentes u otros polímeros por radiación (Marcilla, 2005; Peng, 2005), sin embargo, no ha habido muchas investigaciones sobre la vulcanización por radiación de estos sintéticos.

Algunos de los efectos que se han podido observar, en cuanto a las propiedades mecánicas del elastómero son la disminución de la resistencia a la tracción y el alargamiento disminuye con el aumento de la dosis ya que se presenta un endurecimiento del material, aun así se presenta un aumento en el Módulo Elástico. Después del proceso de radiación, las partículas del elastómero se funden juntas en una película transparente debido a un proceso de evaporación del medio de emulsión; la interacción entre las partículas determina la resistencia a la tracción y el aumento de la resistencia a la rotura de la película esto es debido al aumento de la densidad de la redícula al aumentar la dosis (Liu, 2007).

En estudios con Styrene-butadiene irradiados en una fuente de ⁶⁰cobalto se pudo observar que la dureza de las muestras aumentaba con la dosis. La densidad de reticulación del

polímero aumentó sólo ligeramente y hubo una ligera disminución en la densidad de reticulación del material aromático. (Traeger, 1966)

En otro estudio se reporta la polimerización inducida por radiación de rayos γ ^{60}Co de butadieno en etanol a temperatura que oscila de 15 a 45 ° C en el que se pudo apreciar que la velocidad de polimerización aumenta al agregar peróxido de hidrógeno, el cual se utilizó como iniciador, por el cual se obtuvo polibutadieno. (Zhang, 1991)

1.7 Empleo de la radiación gamma en el concreto

En el concreto, una alternativa que ha probado ser eficiente para aumentar los valores de resistencia, es el uso de la radiación gamma a través de dos métodos:

- a) Modificación de las propiedades estructurales de los refuerzos sintéticos y su posterior incorporación a las mezclas de resina poliéster y agregados minerales.
- b) Irradiación directa del concreto con las fibras o partículas poliméricas incluidas.

Después de la irradiación, los cambios estructurales de los refuerzos se relacionan con las propiedades mecánicas del concreto, incluidas la resistencia a tensión, a la compresión, al impacto, así como las deformaciones en el punto de cedencia y a la ruptura.

Estudios recientes confirman que los concretos poliméricos que son irradiados directamente, tienen valores de resistencia a la compresión mayores que los concretos elaborados con fibras previamente irradiadas, diferencia que se aprecia notablemente para altas dosis de radiación (100 kGy). Dicho efecto está presente para los valores de deformación y de módulo de elasticidad (Galindo, 2007; Martínez-Barrera, 2009)

A pesar de lo anterior, son pocas las investigaciones encaminadas a evaluar el efecto de la radiación gamma en concretos (Martínez-Barrera *et al.*, 2008). En uno de los trabajos se realizó la modificación de fibras del nylon 6 a dosis de 5, 10, 50, y 100 kGy de radiación

gamma, y posteriormente fueron incorporadas en las mezclas de concreto. Se evaluó la resistencia a la compresión, los valores más altos se lograron con fibras irradiadas a 50 kGy y añadidas al 2% en volumen; la resistencia a la compresión fue de 122.2 MPa, con respecto a 35 MPa para el concreto simple (Martínez-Barrera, 2005 y 2006; Martínez-Barrera y Brostow, 2009).

En otro estudio, se analizó el efecto de la radiación gamma en las propiedades mecánicas del concreto utilizado en estructuras para seguridad nuclear. Las muestras se expusieron a la radiación gamma a dosis de 500 kGy y se concluyó que ésta afecta de manera negativa las propiedades mecánicas, pero disminuye la porosidad del concreto, lo que se atribuye a la formación de calcita (CaCO_3) en un medio de CO_2 (Voda'k *et al.*, 2005).

Después de la irradiación, las principales propiedades mecánicas que se analizan y se relacionan con los cambios microestructurales en el concreto son la resistencia a tensión, a la compresión, al impacto, así como las deformaciones en el punto de cedencia y a la ruptura. Los efectos producidos pueden ser controlados mediante una dosis apropiada de radiación, con lo que se transforma la superficie obteniendo un material más rugoso y agrietado que permite lograr una mayor compatibilidad con la matriz cementante (Galindo, 2007; Martínez-Barrera, 2009).

2. JUSTIFICACION

El reciclaje de llantas es un serio problema para el ambiente, se estima que en México de los 30 millones de llantas que se desechan, menos del 10% se recicla. Los tiraderos de llantas no solo son antiestéticos y sitios de riesgo de incendios, sino que además representan un riesgo a la salud como criaderos de fauna nociva como ratas, cucarachas, moscas y mosquitos, que pueden propagar enfermedades. Algunos incendios de estos tiraderos pueden durar meses y hasta años (Taha et al., 2008; Dhir et al., 2001) por lo cual el desecho de llantas en rellenos sanitarios es a menudo prohibido. En consecuencia se ha incrementado el número de tiraderos ilegales con los consecuentes problemas ambientales y de salud, ya que en caso de producirse incendios se contamina el aire, lo vuelve tóxico, contamina los mantos freáticos del subsuelo; además estos sitios se convierten en criaderos de fauna nociva (roedores, cucarachas, víboras, arañas, alacranes, mosquitos, etc.) portadores de enfermedades o que representan un peligro a los seres humanos, así mismo contribuyen al deterioro de la imagen urbana.

Probablemente el método más utilizado de reciclaje de llantas es el reuso de estas después del destalonamiento (remoción de los alambres de acero). Son grandes las limitantes en torno a la reutilización de las llantas (Brown et al., 2011; Brodsky, 2001). El método más común de desecho de llantas es quemarlas para la producción de vapor, electricidad o calor. El uso de llantas como combustible alterno en hornos de cemento es generalizado en todo EU y Europa (Davies y Worthington, 2001). Pero el costo como combustible es considerablemente menos que el material original, de modo que tal uso constituye un buen ejemplo de down-cycling que es el proceso por el cual al recuperar un material para su reutilización, se hace en un producto de menor valor o se compromete la integridad del material a través del proceso de recuperación, lo que significa que no puede ser utilizado en la fabricación del producto original. Otro uso para la reutilización de llantas es en mezclas bituminosas en caliente o como polvo de neumático para la modificación de aglutinantes en los pavimentos de asfalto (Nelson y Hossain, 2001; Amirkhanian, 2001; Navarro et al., 2005). En algunas zonas en el noroeste de México, como Ensenada B.C. y Rosarito lo utilizan en el asfalto, para el sobre-encarpetado del pavimento.

Sus aplicaciones han sido más o menos efectivas, pero a veces son insuficientes para la reducción en las reservas de llantas de desecho. Una opción viable es el uso del elastómero

de la llanta como sustituto del agregado fino o grueso del concreto. Aunado al beneficio que las propiedades específicas del elastómero puede otorgar, en comparación a las propiedades mecánicas de la arena, grava natural o piedra triturada (Resistencia y módulo elástico)

El concreto es uno de los materiales más importantes dentro de la industria de la construcción, esto se debe no solo a su costo sino a las propiedades que presenta tanto en estado fresco como en estado endurecido, ejemplo de ello es su fácil colocación antes del fraguado, su resistencia al intemperismo, su durabilidad y resistencia a esfuerzos normales. Debido a esto su uso es muy popular alrededor del mundo, sin embargo su empleo tiene un gran impacto en el medio ambiente, en primer lugar, se requieren de una gran cantidad de recursos naturales para su fabricación (Arena, grava y agua), además la producción del Cemento Portland genera dióxido de carbono que es liberado a la atmósfera, se estima que la industria cementera es la responsable de la emisión de una tonelada de CO₂ al año a nivel mundial (Malhotra, 2000).

En aras de reducir el impacto ecológico que esto conlleva, se han hecho esfuerzos por disminuir el consumo de recursos naturales no renovables en la fabricación del concreto, uno de estos en la fabricación o adición de materiales reciclados a la mezcla en sustitución de los agregados comunes, pero a su vez, cuidar la calidad del producto y de ser posible buscar el incremento de las propiedades deseables como la resistencia, el módulo de elasticidad, la durabilidad y la apariencia del concreto.

Los elastómeros de las llantas provienen de procesos de rallado, picado y molido con tamaños entre 450 mm (piezas trituradas) y 75 µm (partículas de polvo). Debido a la gran diferencia entre el módulo de Young del elastómero y de la matriz de cemento, se presentan diferencias en las propiedades mecánicas del concreto con agregado natural convencional y el concreto con elastómero reciclado de llanta. La más importante es la pérdida de resistencia a la compresión y a la tensión, así como la rigidez, cuando se incrementa el contenido de elastómero.

La pérdida de resistencia puede ser del orden del 80% (El-Dieb et al., 2001; Eldin y Senouci, 1993), ya que las partículas de elastómero no sólo actúan como concentradores de

esfuerzo, sino que también son responsables de degenerar esfuerzos de tensión dentro de la matriz del concreto, que dan lugar a un rápido agrietamiento y la pronta falla. Por otro lado, las partículas de elastómero tienen un efecto limitador sobre la propagación de grietas, que conduce a un aumento significativo en la resistencia a tensión, en su ductilidad y en la capacidad de absorción de energía. (Taha et al., 2008; El-Dieb et al., 2001).

Otra ventaja del elastómero es la absorción de sonido. Se ha propuesto explotar el potencial de absorción de energía de elastómero en beneficio de la elasticidad del concreto. Sin embargo, debido a las incompatibilidades entre los módulos de Young del elastómero y la matriz de concreto, se tendrían que someter los concretos a grandes deformaciones, en cuyo caso las cargas aplicadas podrían causar disminución progresiva en las propiedades mecánicas.

Con la posibilidad abierta de obtener grandes beneficios con la reutilización del elastómero reciclado de llantas en concretos, es necesaria una mayor investigación para asegurar el beneficio económico en el contexto del desarrollo sostenible que implica el poder resolver el problema de la contaminación ambiental y el manejo de las llantas de desecho actual sin que esto implique un riesgo económico, sino por el contrario, que represente sea un negocio favorable que contribuya al bienestar de la población mejorando su calidad de vida.

3. HIPOTESIS

Mediante la modificación por radiación gamma de las propiedades fisicoquímicas del elastómero obtenido del reciclaje de llantas de desecho, es posible obtener un material de refuerzo para el concreto, que permita el mejoramiento de las propiedades mecánicas del mismo.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General:

Evaluar los efectos de los elastómeros de llantas modificados por radiación gamma en las propiedades mecánicas de concretos.

4.2. Objetivos Específicos:

- a) Obtener partículas de llantas de desecho (elastómeros) de tamaños micrométricos mediante el procedimiento de molienda.
- b) Irradiar las partículas de elastómero micrométricas mediante radiación gamma a dosis de 200, 250 y 300 kGy.
- c) Caracterizar las partículas de elastómero antes y después de la irradiación con las técnicas de: Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).
- d) Elaborar especímenes de concreto hidráulico sin la adición de elastómeros para ser utilizados como testigos
- e) Elaborar especímenes de concreto hidráulico con partículas de elastómeros *sin irradiar* variando la concentración en 10, 20 y 30% del peso del agregado fino.
- f) Elaborar especímenes de concreto hidráulico con partículas de elastómeros *irradiadas* variando la concentración en 10, 20 y 30% del peso del agregado fino.
- g) Caracterizar los especímenes de concreto mencionadas en los tres incisos anteriores mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia a la tensión, módulo de elasticidad y resistencia al impacto (Propiedades Mecánicas).
- h) Irradiar los especímenes de concreto hidráulico elaborados con partículas de elastómeros *sin irradiar* junto con un testigo (0% de elastómero) a dosis de 200, 250 y 300 kGy.

- i) Caracterizar los especímenes de concreto mencionadas en el punto “h” mediante las técnicas de caracterización mencionadas en el punto “g”.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

Los pasos para la realización del presente proyecto se esquematizan en el siguiente diagrama de flujo:

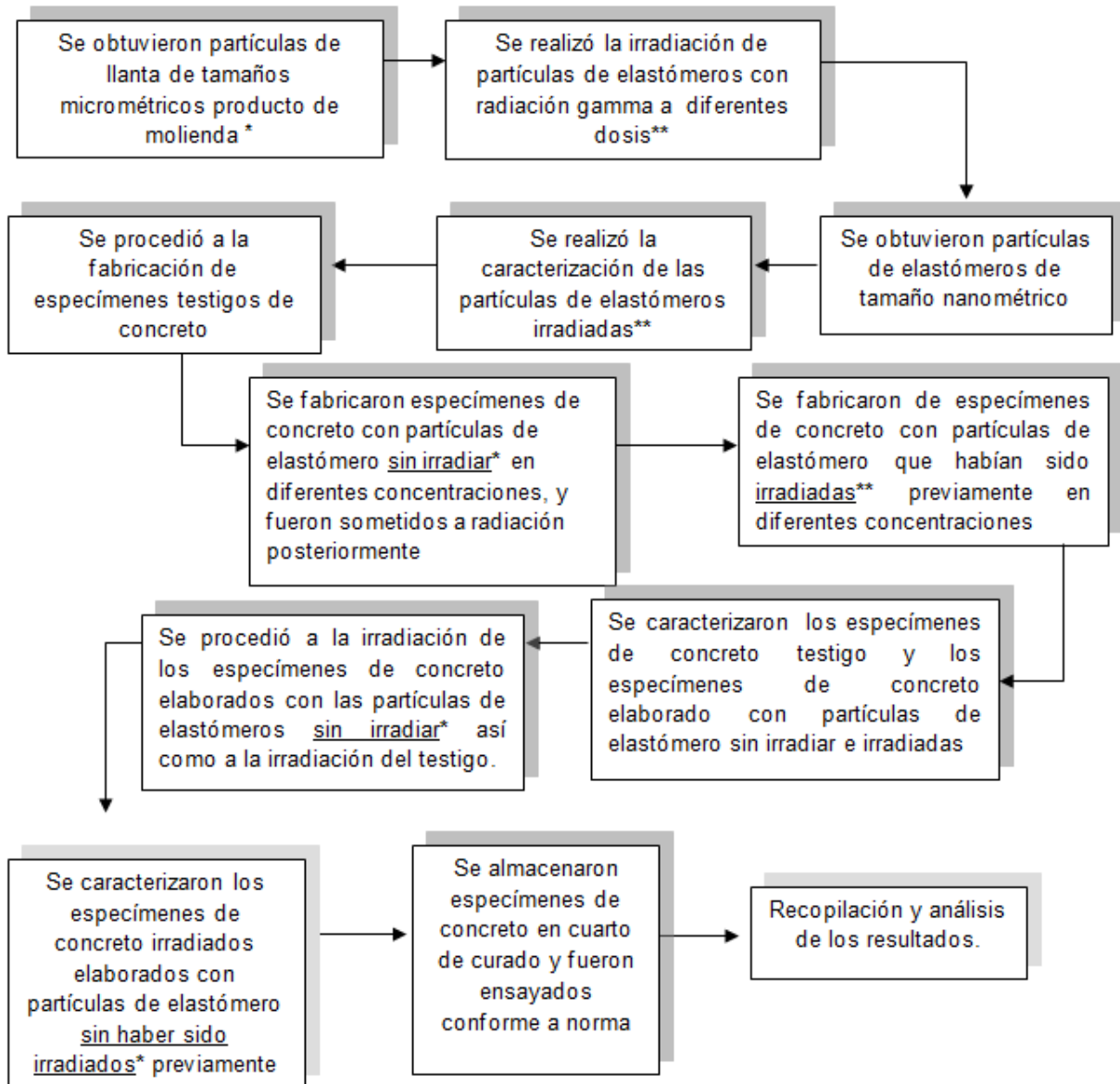


Figura 6. Metodología Desarrollada.

5.1 . Descripción de la Metodología.

Materiales de uso comercial:

- Cemento Portland tipo I y tipo II (CPC y CPP)
- Grava TN = 40 mm (agregado grueso)
- Arena natural MF = 3.7 (agregado fino)

Materiales de desecho:

- Elastómero proveniente de la molienda de llantas de desecho.

Equipos:

- Moldes y herramienta para la elaboración de especímenes de concreto.
- Microscopio electrónico de barrido con EDS, marca JEOL modelo JSM. Resolución de 3.0 nm con una capacidad de 0.5 a 30 kV de aceleración.
- Irradiador Gammabeam modelo 651 PT marca NORDION con lápices de ^{60}Co con vida media de 5.2 años.
- Máquina Universal de Pruebas marca Controls^{MR} con capacidad de 120 toneladas.

Procedimiento experimental:

- a) Se adquirió el material de llantas recicladas (en desuso) de dos tamaños 2.80mm (7 Mesh) y de 0.85mm (20 Mesh). El material fue enviado de Guadalupe N.L. directamente por el proveedor.
- b) Se irradiaron las partículas de elastómero micrométricas mediante radiación gamma a dosis de 200, 250 y 300 kGy. Con una razón o tasa de dosis de 4 a 6 kGy/h en el irradiador Gammabeam con fuentes de alta actividad de ^{60}Co .

- c) Se realizó la caracterización las partículas de elastómero antes y después de la irradiación mediante la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).
- d) Se elaboraron especímenes de concreto hidráulico sin la adición de elastómero para ser utilizados como testigo. Se utilizó cemento Portland tipo I y tipo II de acuerdo a la disponibilidad en el mercado (CPC y CPP conforme a norma NMX-C-414), agua y agregados (grava y arena sílice) conforme a la norma ASTM C/192.
- e) Se elaboraron especímenes de concreto hidráulico con partículas de elastómero *sin irradiar* variando la concentración de 10% 20% y 30% en sustitución del agregado fino, bajo las mismas normas del inciso “d”.
- f) Se elaboraron especímenes de concreto hidráulico con partículas de elastómero *irradiadas* variando la concentración de 10% 20% y 30% en sustitución del agregado fino, bajo las mismas normas del inciso “d”.
- g) Se realizó la caracterización de los especímenes de concreto mencionadas en los puntos “d, e, f” mediante Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).
- h) Se realizó el ensaye de los especímenes de concreto mencionadas en los puntos “d, e, f” mediante:
- Resistencia a la compresión: se sometieron los especímenes de concreto a un esfuerzo de compresión axial, hasta que alcanzan su máxima resistencia de acuerdo a la norma ASTM C 39/C 39M-01.
 - Resistencia a la flexión: se ensayaron especímenes prismáticos aplicando una carga en el tercio medio de su longitud total, hasta que se fracturan (ASTM C 78-00).

- Resistencia a la tensión: se ensayaron especímenes de concreto a una carga de tensión indirecta (prueba brasileña) hasta que se fracturan (ASTM C496/ C496M)
 - Módulo de elasticidad: las probetas se sometieron a un esfuerzo de compresión con incrementos controlados, registrando cada uno de ellos y su correspondiente deformación; posteriormente se graficaron dichos valores para obtener la pendiente de la curva de acuerdo a la norma ASTM C 469 – 94.
- i) Se irradiaron los especímenes de concreto hidráulico elaborados con partículas de elastómeros *sin irradiar* junto con un testigo (0% de elastómero) a dosis de 200 y 300 kGy
- j) Se procedió a la caracterización de los especímenes de concreto mencionadas en el punto “h” mediante la técnica de caracterización mencionadas en el punto “g”.
- k) Se almacenaron los tres diferentes tipos de especímenes de concreto (con partículas de elastómero *sin irradiar*, con partículas *irradiadas*, y los testigos) y se evaluaron las propiedades mecánicas de acuerdo al punto “h”.

5.2. Procedimiento para la elaboración de especímenes de concreto.

5.2.1. Pruebas a los agregados

5.2.1.1 Granulometría y Pesos Volumétricos.

Se realizó la determinación de la granulometría y de los pesos volumétricos de los agregados gruesos (grava) y de los agregados finos (arena) con el procedimiento descrito según la norma NMX C-077:

Se realizó la determinación de los pesos volumétricos suelto y compacto para los agregados gruesos (grava) y de los agregados finos (arena) con el procedimiento descrito según las normas NMX C-073 y NMX C-077.

Se realizó la determinación de la humedad de los agregados gruesos (grava) y de los agregados finos (arena) con el procedimiento descrito según la norma NMX C-073.

Material y equipo.

- 2 Cubetas.
- 2 Palas
- 2 Cucharones grandes
- 1 Cuarteador para arena (incluye tres charolas y cuchara)
- 2 Cepillos de cerdas suaves
- 1 Juego de ollas para peso volumétrico
- 1 Vernier
- 1 Balanza digital
- 2 charolas de 40x40cm
- 2 Sartenes
- 2 Espátulas de lámina
- 1 Vidrio.
- 2 Varillas compactadoras.
- 1 Barra enrasadora
- 1 Juego de cribas para arena
- 1 Juego de cribas para grava
- 1 Cepillo de cerdas de cobre
- 2 Mecheros grandes
- 1 Parrilla eléctrica.
- 1 Trozo de Polín
- 1 Escoba.
- 2 costales
- 1 Franela.
- 1 par de guantes

Procedimiento

Muestreo y Cuarteo.

1. Se realizó el muestreo de la grava y la arena como se indica en la norma NMX C-030 tomando pequeñas muestras del material de diferentes partes del montículo con ayuda de una cuchara o pala hasta llenar una cubeta para cada material.



2. Se realizó el cuarteo de la arena y de la grava como lo indica la norma NMX C-170. Para la arena se empleó el cuarteador mecánico y para la grava el cuarteo manual. El cuarteo se realizó hasta tener una muestra reducida de aproximadamente 2 Kg. para la grava y 1 Kg. para la arena, estos pesos se definieron bajo el criterio indicado por el guion de laboratorio de Ing. León Fernández Orozco, con el fin de realizar pruebas más cómodas sin que se perdiera la representatividad de los resultados.



3. Las muestras reducidas se emplearon para el análisis granulométrico.
4. Del material sobrante del cuarteo se determina el peso volumétrico suelto y compacto

Granulometría

1. Se pesó la muestra reducida (Ph)
2. Se calentó la muestra reducida hasta que estar seca, esto se comprobó al pasar un vidrio sobre el material hasta que este no se empañara, en ese momento el material está en estado seco.
3. Se pesó la muestra seca (Ps)
4. Para la granulometría de la arena se ordenaron las cribas de forma descendente como sigue: No. 4, 8, 16, 30, 50, 100, charola.



5. Para la granulometría de la grava se ordenaron las cribas de forma descendente como sigue: 3, 2, $\frac{1}{2}$, 1, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{8}$, 4, charola.



6. Se vació el material con cuidado en el interior de las cribas y se colocó la tapa.
7. Las cribas se colocaron en la máquina cribadora y se agitaron durante 5 minutos.
8. Pasado ese tiempo, se retiraron las cribas y se realizó un cribado manual removiendo el material con la mano hasta que no pase material a través de las mallas.
9. Se pesó todo el material retenido en cada una de las cribas procurando no perder material.
10. Se sumaron todos los pesos retenidos y se calcularon los retenidos parciales y los retenidos acumulados para trazar las gráficas granulométricas de la grava y de la arena.

11. Con los resultados se determinó el módulo de finura de la arena y el tamaño nominal de la grava.



Peso Volumétrico Compacto (PVC)

1. Se homogeneizó el material sobrante del cuarteo.
2. Se calculó el volumen (V_r) en metros cúbicos y el peso (W_r) del recipiente en kilogramos.
3. Se vació el material en el recipiente, con una altura de caída de 5cm hasta llenar un tercio del volumen del recipiente.
4. Se compactó el material con una varilla de compactación dando 25 golpes con la punta redonda de la varilla, abarcando toda la superficie del material y procurando no golpear el fondo del recipiente.
5. Se continuó vaciando el material hasta llenar otro tercio del volumen del recipiente y se compactó de la misma forma, procurando penetrar el tercio anterior de material.
6. Se continuó vaciando el material hasta llenar el recipiente y se compactó nuevamente, procurando penetrar la capa anterior de material.
7. Se terminó de llenar el recipiente y se enrazó.

8. Después de limpiar la superficie exterior del recipiente, se tomó el peso del recipiente lleno del material (W).
9. Este procedimiento se realizó dos veces más y se calculó el promedio de los tres pesos, (Wp), se restó el peso del recipiente (Wr) para obtener el peso del material compacto (Wm).
10. El peso volumétrico (PVCm) sin corregir se determinó con el cociente de Wm entre Vr.
11. Se realizó una corrección por humedad para obtener el Peso Volumétrico Compacto corregido con la siguiente fórmula:

$$PVC_c = \frac{PVC_M}{1 + H}$$

Peso Volumétrico Suelto (PVS)

1. Se homogeneizó el material sobrante del cuarteo.
2. Se calculó el volumen (Vr) en metros cúbicos y peso (Wr) del recipiente en kilogramos.
3. Se vació el material con una altura de caída de 5cm, en el recipiente hasta llenarlo, sin compactar.
4. Se enrazó, se limpió la superficie exterior del recipiente y se pesó (W).
5. Este procedimiento se realizó dos veces más y se calculó el promedio (Wp).
6. El peso del material suelto (Wm) se obtuvo de la diferencia de Wp menos Wr.

7. El Peso volumétrico suelto sin corregir PVS_M se calculó dividiendo W_m entre V_r .
8. Se hizo una corrección por humedad con la siguiente fórmula:

$$PVS_c = \frac{PVS_M}{1 + H}$$

Humedad (H)

1. La humedad, tanto para la grava como para la arena, se calculó con la expresión matemática siguiente.

$$H = \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

2. Se expresó la humedad en porcentaje multiplicando H por 100.

5.2.1.2. Pesos específicos y Absorción

Se realizó la determinación los pesos específicos saturado superficie seca, el peso específico seco y el índice de absorción de la grava y la arena de acuerdo a las normas NMX C-164 y NMX C-165.

Material y equipo

- 1 Cubeta de 19L
- 1 Cubeta pequeña
- 2 charolas de 40 x 40cm
- 1 charola de 40 x 60cm

- 2 cucharones grandes
- 1 pala
- 1 Escoba
- 2 Mecheros grandes
- 2 cribas del no.4
- 1 Parrilla eléctrica
- 2 franelas
- 1 Balanza electrónica.
- 2 Sartenes.
- 1 cono de bronce con pisón
- 1 picnómetro de sifón
- 1 frasco de Chapman
- 1 embudo grande
- 1 Cuchara sopera
- 1 Cepillo de cerdas suaves
- 1 Vidrio rectangular.
- 2 espátulas de lámina.
- 1 Pizeta.
- 2 probetas de 1L
- 1 par de guantes

Procedimiento

Peso específico saturado superficie seca de la grava

Un día antes de la realización de la prueba.

1. Se realizó el muestreo de material según la norma NMX C-030.
2. Se realizó el cuarteo del material como lo indica la norma NMX C-170 hasta tener una muestra reducida de 5 Kg. a 6 Kg. estos pesos se definieron bajo el criterio

indicado por el guion de laboratorio de Ing. León Fernández Orozco, con el fin de realizar pruebas más cómodas sin que se perdiera la representatividad de los resultados.

3. El material se vació en una charola de 40 x 40cm y se secó.
4. Después el material se cribó con la malla no. 4, el material que quedo retenido se depositó en una cubeta pequeña y se descartó el material que pasó a través de la malla.
5. Se vació agua en la cubeta hasta que cubrió todo el material y se dejó reposar por 24 hrs.

El día de la prueba.

6. Se sacó el material en porciones pequeñas y se colocó sobre una tela absorbente.
7. El material se secó superficialmente con la tela hasta eliminar el agua superficial de las piezas de grava.
8. Se pesó una muestra de aproximadamente 1.2 Kg. a 1.5 Kg. de material (Psss).
9. Se aforo el picnómetro de sifón, se introdujo el material y se calculó el volumen de material midiendo el volumen de agua desalojado por el sifón en una probeta graduada (V).



10. El peso específico saturado superficialmente seco (P_{ss}) se determinó dividiendo P_{ss} entre V .

Absorción de la grava.

1. El material sobrante de la prueba anterior (de 3.5 a 4 Kg.), se secó superficialmente con una franela.
2. Se pesó una muestra de 1.5 Kg. aproximadamente (P_{ss}) y se secó.
3. El material seco se pesó (P_s).
4. La absorción (A) se calculó con la formula siguiente:

$$A = \frac{P_{ss} - P_s}{P_s}$$

Peso específico seco de la grava.

El peso específico seco (Pes) se calculó con la siguiente expresión:

$$Pes = \frac{Pesss}{1 + A}$$

Peso específico saturado superficie seca de la arena.

Un día antes de la realización de la prueba.

1. Se realizó el muestreo de material según la norma NMX C-030.
2. Se realizó el cuarteo del material como lo indica la norma NMX C-170 hasta tener una muestra reducida de 6 Kg. a 8 Kg.
3. El material se vació en una charola de 40 x 40cm y se secó.
4. Después el material se depositó en una cubeta pequeña y se vació agua en la ella hasta que cubrió todo el material y se dejó reposar por 24 hrs.

El día de la prueba.

5. Se sacó una porción de aproximadamente 3 Kg. de material (sin pesar), se escurrió el agua y se colocó en una charola de 40 x 40 cm.
6. El material se calentó, removiéndolo constantemente, hasta el momento en que los granos más finos depositados en el fondo de la charola comenzaron a cambiar de color.
7. La charola se retiró y se dejó enfriar el material.

8. Se tomó un puñado de material y se apretó con la mano, al abrir la mano e inclinarla un poco, se observó si ruedan grumos pequeños y pocos granos quedan en la mano, de ser así se considera que la muestra puede estar ya en estado saturado superficie seca y se realizó la prueba del cono para asegurar esta aseveración; en caso contrario se siguió calentando el material.
9. Para realizar la prueba del cono, se limpió una superficie plana y lisa, y se colocó el cono de Abrams sobre esa superficie, con la abertura más pequeña hacia arriba.
10. El material se vació en el interior del cono hasta llenarlo, se sobrepuso el pisón en la superficie del material para que el este se compactase por el peso propio del pisón. Se aplicaron 25 colocaciones del pisón deteniéndose cada vez que la superficie del material bajó 2 mm o más. En este caso, se detuvo el proceso de compactación, se llenó nuevamente el cono y se continuó con la compactación hasta completar las 25 colocaciones.
11. Una vez terminada la compactación, se terminó de llenar el cono, se enrazó y se limpió la superficie alrededor del cono.
12. Después, con sumo cuidado se levantó el cono verticalmente tratando de no tocar el material con la pared del cono, este procedimiento se realizó hasta obtener el estado deseado en el cual el material, al desmoldarse, se desmoronó parcialmente por sí solo o apoyando el dedo índice sobre la parte superior del material en un ángulo de 45°.



13. Una vez que el material quedó en estado saturado superficialmente seco, se pesó una muestra de 500gr (Pss).
14. Se llenó el frasco de Chapman hasta la marca de 200ml (Vo) y se introdujo el material cuidando el no tirar material fuera del frasco y procurando que no quedasen granos adheridos en la pared del mismo.



15. La boquilla del frasco se sostuvo con una mano y la base se hizo girar con la otra mano hasta eliminar las burbujas de aire atrapado en su interior.
16. Se dejó reposar el contenido del frasco y se midió el volumen indicado (V_f). El volumen del material en estado saturado superficialmente seco (V) se obtuvo de la diferencia de $V_f - V_o$.
17. El Peso específico saturado superficialmente seco (P_{ssss}) de la arena se calculó al dividir P_{ssss} entre V .

Absorción de la arena.

1. De la muestra de arena en estado saturado superficialmente seco, se pesó una muestra de 750gr a 1kg (P_{ssss}).
2. La muestra se secó y se pesó (P_s).
3. La absorción de la arena se calculó con la siguiente fórmula:

$$A = \frac{P_{ssss} - P_s}{P_s}$$

Peso específico seco de la arena

El peso específico seco (P_{es}) se calculó con la expresión siguiente:

$$P_{es} = \frac{P_{ssss}}{1 + A}$$

5.2.2 Diseño y fabricación de concreto

Se realizó el diseño de concreto con base en los resultados obtenidos de las prueba a los agregados y utilizando el método que marca el ACI 211 con ayuda de las siguientes tablas.

TABLA I

Revenimiento cm.	Valores medios de Agua, Kg/m ³ para obtener el revenimiento deseado en función del tamaño nominal del agregado grueso en mm.						
	10mm	13mm	20mm	25mm	40mm	50mm	76mm
3	202	195	186	176	163	151	126
5	214	205	195	184	171	159	135
10	231	218	207	194	182	170	149
15	241	227	215	201	189	177	158
18	246	230	218	204	192	180	162

TABLA II

CEMENTO TIPO I	
Relación A/C (agua – cemento en peso)	Resistencia, a la compresión a 28 días Kg/cm ²
0.35	480
0.38	450
0.41	420
0.43	400
0.48	350
0.54	300
0.57	280
0.62	245
0.68	205
0.72	185
0.76	165
0.82	140

TABLA III

Aire atrapado, en % del volumen del concreto	
Tamaño Nominal del agregado grueso mm	VALORES MEDIOS
10	3
13	2.5
20	2
25	1.5
40	1
50	0.5
75	0.3

TABLA IV

Volumen de agregado grueso (grava) por volumen unitario de concreto.				
Tamaño máximo nominal del agregado, mm	Volumen de agregado grueso* compactado en seco, por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de la arena.			
	2.40	2.60	2.80	3.00
10 (3/8")	0.50	0.48	0.46	0.44
13 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53
20(3/4")	0.66	0.64	0.62	0.60
25(1")	0.71	0.69	0.67	0.65
40(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

*Los volúmenes se basan en agregados en condiciones de varillado en seco, como se describe en la Norma ASTM C 29. Estos volúmenes se han seleccionado a partir de relaciones empíricas para producir concretos con un grado de trabajabilidad adecuado a la construcción reforzada común.

Se realizó la fabricación de cilindros de concreto de 15 x 30 cm según lo marca la norma NMX-C-160-ONNCCE-2004.

Material y equipo.

- 10 Moldes cilíndricos
- Desmoldante
- Estopa
- 2 Pinzas de mecánico
- 2 Pinzas de presión
- 2 Llave de tubo para tuercas de mariposa
- 2 Espátulas con mango
- 1 Mazo de goma
- 1 báscula digital
- 1 balanza mecánica.
- 1 mezcladora de concreto tipo trompo
- 2 costales
- 1 olla para aire ocluido con su manguera
- 1 cuchara de albañil
- 2 Palas
- 4 Cubetas de 19L
- 2 sartenes
- 2 Cucharones grandes.
- 2 Espátulas de lámina
- 2 vidrios rectangulares
- 1 escoba
- 1 cono de revenimiento.
- 1 barra enrasadora
- 2 Varillas compactadoras
- 1 Mazo de goma.
- 1 charola de 60x90cm
- 2 Probetas de 1L
- 1 Par de guantes

- 1 Pizeta
- 1 Flexómetro
- 1 Pinzas de presión
- 1 pinzas de mecánico.
- 1 llave de tubo para tuercas de mariposa
- 1 Carretilla
- 1 vernier de 12 in

Procedimiento.

5.2.2.1 Mezcla de prueba:

Un día antes de realizar la prueba.

1. Se determinó la mezcla a realizar en cuanto a tipo de cemento a emplear y relación agua/cemento, así como el revenimiento esperado, se calculó la dosificación base con los resultados obtenidos de las pruebas a los agregados.
2. Se calculó el volumen de mezcla a fabricar para colar los cilindros a ensayar a distintas edades.
3. Se realizó el muestreo de la grava y de la arena empleando el procedimiento descrito anteriormente para las pruebas a los agregados.
4. Se llenaron costales de grava y de arena suficiente para la fabricación de las mezclas de concreto y se almacenaron.

El día de la prueba.

1. Se determinó la humedad de la grava y de la arena, empleando los materiales almacenados en los costales.



2. Se pesaron las cantidades de grava y arena a emplear en la mezcla y se vaciaron en costales o cubetas cubiertos con trapos húmedos para evitar la pérdida de humedad.
3. Toda la herramienta fue humedecida con agua antes de fabricar el concreto.
4. El agua se midió por peso con la ayuda de las probetas y la báscula, y se vació en cubetas según la dosificación.
5. El cemento se tomó de los bultos destinados para el proyecto dentro del laboratorio, eligiendo el tipo según el plan de trabajo.
6. Se sacó el trompo del almacén y se vació un poco de agua en su interior. Se encendió la máquina para que el agua lubricase su interior. No se usó del agua destinada para la mezcla.
7. Una vez hecho esto, se procedió a apagar la máquina y se vació el agua en una cubeta la cual se utilizó para humedecer la herramienta empleada.
8. Después, se encendió la máquina y se vació el agua de la dosificación, reservando de 2 a 3 litros.

9. Se vació la grava y después la arena dentro del trompo aún en marcha procurando su correcto mezclado.
10. Por último, se vació el cemento procurando no perder material para no afectar la relación agua/cemento.
11. Se mezclaron los materiales de 3 a 5 minutos o hasta que la mezcla fue homogénea.
12. Pasado ese tiempo, se colocó el cono de revenimiento previamente humedecido en una charola de 60 x 90 cm limpia y previamente humedecida, con la abertura más grande hacia abajo. Se colocaron los pies sobre las lengüetas y la misma persona que sujetó el cono procedió a llenarlo.
13. Se llenó una tercera parte del cono con el concreto recién mezclado y se compactó dando 25 golpes repartidos en espiral en toda la superficie. Se llenó la siguiente tercera parte del cono y se compactó el material. Se llenó el cono y se compactó. Por último, se enrazó el cono.
14. Se sujetó el cono con las manos y se retiraron los pies de las lengüetas.
15. El cono se levantó verticalmente hasta que se retiró completamente de la mezcla. Este paso duró aproximadamente 5 segundos.
16. El cono metálico se colocó a un lado del cono formado con concreto, con la abertura más grande hacia arriba. Sobre esta abertura se colocó la varilla de compactación y se midió la distancia vertical de la parte inferior de la varilla al centro de la parte más plana del cono.



17. Se determinó el valor del revenimiento según la norma NMX-C-156-ONNCCE-1997 y se comparó con las tolerancias indicadas en la norma NMX-C-155.

18. En los casos en los que el revenimiento obtenido fue menor que el valor del revenimiento deseado, se realizó la corrección pertinente de la siguiente manera:

a) Se agregó a la mezcla un volumen de agua igual a:

$$V_{H_2O} = 2 \times \text{No. De centímetros faltantes para el revenimiento} \times \text{volumen de la mezcla} / 1000$$

Donde V es el volumen de agua en dm^3 o litros. La masa de cemento es igual a:

$$M_c = V_{H_2O} \times \rho_{H_2O} / R_{A/C}$$

Donde M_c es la masa de cemento en kilogramos, V_{H_2O} es el volumen de agua en dm^3 , $R_{A/C}$ es la relación agua cemento y ρ_{H_2O} es la densidad del agua igual a 1 kg/dm^3 .

b) Se vació el concreto usado para el revenimiento y las cantidades calculadas de agua en la olla mezcladora y se mezclan de 2 a 5 minutos.

c) Una vez hecho esto, se repitió la prueba de revenimiento y se reportó el valor del revenimiento obtenido. Se vació el material para revenimiento en la olla

y se procedió al llenado de los moldes y al cálculo de contenido de aire atrapado en el concreto.

5. Se llenó la olla para medir el contenido de aire según el procedimiento que estipula la norma NMX-C-157-ONNCCE-1987, cuidando no golpear la olla con la varilla. Se limpió la olla y se pesó. Se colocó la tapa y se llenó de agua hasta que el nivel llegó a la marca “cero” en la escala graduada. Se permitió que la válvula que se encuentra en la base de la tapa estuviera abierta durante el llenado de la olla, cerrándose hasta que el agua salió de ella. La válvula superior permaneció abierta hasta que el nivel de agua llegó en la marca “cero”. Una vez cerradas las válvulas, se inyectó aire hasta que el manómetro indicó la presión de calibración. En ese momento, se tomó el valor que indicó el nivel de agua en la escala graduada. Se tomó esta lectura como el porcentaje de aire contenido en la mezcla de concreto.
6. Se desechó la mezcla sobrante y se limpió el trompo dejándolo funcionar con un poco de grava y agua en su interior para retirar el concreto adherido en las paredes.
7. Se limpió perfectamente toda la herramienta y se tiraron los desperdicios en el área del cascajo.
8. Con los resultados obtenidos se procedió a calcular los rendimientos de la mezcla y así obtener los valores corregidos de P_{ss} y %Abs de los agregados.
9. Por último se determinó la proporción a utilizar para la relación Agua/Cemento.

Una vez definida la dosificación de las mezclas se fabricaron los especímenes de prueba para los ensayos a Compresión, Módulo de Elasticidad y prueba Brasileña.

Al obtener la mezcla de campo, esta se utilizó para la fabricación de todos los especímenes. La sustitución del agregado de llanta se realizó en volumen.

Procedimiento.

Un día antes de realizar la prueba.

1. Se ajustaron, limpiaron y engrasaron los moldes de cilíndricos de metal de 30 x 15cm. y almacenaron.



2. Se determinó la mezcla a realizar en cuanto a tipo de agregado y el revenimiento esperado, se calculó la dosificación base con los resultados obtenidos de las pruebas a los agregados.
3. Se calculó el volumen de mezcla a fabricar para colar los cilindros a ensayar a 28 días de edad.
4. Se realizó el muestreo de la grava y de la arena empleando el procedimiento descrito anteriormente para las pruebas a los agregados.
5. Se llenaron costales de grava y de arena suficiente para la fabricación de las mezclas de concreto y se almacenaron.

El día de la prueba.

1. Se determinó la humedad de la grava y de la arena, empleando los materiales almacenados en los costales.
2. Se pesaron las cantidades de grava y arena a emplear en la mezcla y se vaciaron en costales o cubetas cubiertos con trapos húmedos para evitar la pérdida de humedad.
3. Se procedió a la fabricación del concreto como se describió anteriormente y se fabricaron los especímenes de concreto requeridos.
4. Los moldes cilíndricos fueron llenados a cada tercera parte de su volumen y se compactó el material a cada tercio con 25 golpes de la varilla compactadora. Cuando la última capa fue compactada, el molde se enrazó y se afino la superficie de la mezcla para que quedase completamente lisa. Se dieron unos ligeros golpes a la pared del molde con un mazo de goma para sacar la mayor parte de aire atrapado en la mezcla.



5. Se limpió la superficie exterior de los moldes cilíndricos y se almacenaron dentro del laboratorio.

Un día después de la prueba.

1. Se procedió a descimbrar los cilindros y se etiquetaron indicando la fecha de fabricación, el porcentaje de agregado de llanta, en su caso si el material estaba irradiado y el número de mezcla para control.



2. Se almacenaron los cilindros en el cuarto de curado bajo condiciones estándar de humedad y temperatura.
3. Los moldes se limpiaron, se ajustaron, se engrasaron y se llevaron al almacén nuevamente.
4. Se procedió al ensaye de los cilindros de concreto a la edad de 28 días para medir la resistencia del concreto y el módulo de elasticidad según la cantidad de agregado de llanta así como de la intensidad de irradiación del elastómero de llanta según el procedimiento descrito en la norma NMX-C-083-ONNCCE-2002 y NMX-C-128-ONNCCE-1997.

Para la elaboración de todos los especímenes se utilizó cemento Portland tipo II (CPP conforme a norma NMX-C-414), agua y agregados (grava y arena) conforme a la norma ASTM C/192.

Se fabricaron los especímenes de concreto hidráulico con partículas de elastómero variando la concentración entre 10%, 20% y 30%, variando igualmente las granulometrías de 2-3 mm y 20 mesh¹.

Se realizaron dos mezclas de concreto hidráulico simple (sin elastómero) que constaron de 20 cilindros cada una.

Se realizaron doce mezclas de concreto con agregado de elastómero de llanta sin irradiar; seis mezclas para la granulometría de 2-3 mm y seis para la granulometría de 20 mesh. En ambos casos se realizaron dos mezclas por cada concentración del agregado, es decir, dos para 10%, dos para 20% y dos para 30%. Para el caso de las mezclas antes mencionadas cada una consto de veinte cilindros.

Para el caso del material irradiado a 200 kGys se fabricaron seis mezclas, tres por cada granulometría, para cada una de ellas correspondió una mezcla por cada concentración del agregado. En el caso de las mezclas antes mencionadas cada una consto de diez cilindros.

Se almacenaron todos los especímenes durante un periodo de 28 días, para su posterior ensaye.

5.2.3. Ensayes mecánicos

5.2.3.1. Resistencia a la Compresión

La determinación de la resistencia a la compresión se realizó conforme a la norma Mexicana NMX-C-083-ONNCCE 2002.

1. Se pesaron y midieron las dimensiones de los cilindros de concreto almacenados en el cuarto de curado.

¹ Según la Tyler Standard Screen Scale, mesh lo representa la abertura útil de pasaje dentro de una pulgada inglesa equivalente a 25.4 mm. Por lo tanto 20 mesh representa una abertura de malla de 0.833 mm.



2. Se cabecearon según la norma Mexicana NMX-C-109_ONNCCE. Se calentó azufre en una jarra de metal, moviéndolo constantemente hasta que se volvió líquido. Inmediatamente después, se engrasó perfectamente el molde y se vació el azufre líquido hasta llenar la mitad del mismo y se colocó el espécimen de concreto con ayuda de las guías del molde hasta que el extremo del cilindro quedó sumergido dentro del azufre. Cuando el azufre líquido se secó, se retiró el cilindro después de golpearlo levemente con un mazo de goma. Se dejó enfriar la cabeza de azufre, se limpió el molde y se engrasó nuevamente para cabecear el otro extremo del cilindro.



3. El molde se limpió perfectamente al terminar de cabecear todos los cilindros.



4. Fue necesario usar mascarilla durante el proceso de cabeceo.
5. Se colocó el manómetro en la máquina de prueba y se colocó el espécimen de concreto (ya cabeceado) en el interior de la máquina centrándolo sobre la platina inferior y con la platina superior.



6. Se aplicó la carga hasta que el espécimen falló y se leyó su magnitud en el manómetro.



7. Después, se retiró el espécimen, se quitó el cascajo de la máquina y se determinó la resistencia del espécimen:

$$f'c = \frac{P}{A} = \frac{4 * P}{\pi * D^2}$$

Donde: $f'c$ es la resistencia a la compresión en kg/cm^2 , A es el área de la superficie circular del cilindro en cm^2 , P es la carga aplicada por la máquina indicada por el manómetro en kg , D es el diámetro en cm de la sección circular del cilindro donde fue aplicada la carga y $\pi=3.14159$



8. Este procedimiento se repitió para los demás cilindros.

5.2.3.2. Prueba de Módulo de Elasticidad (Carga Deformación)

La determinación del Módulo de elasticidad estático se realizó conforme a la norma Mexicana NMX-C-128-1997-ONNCCE.

1. Para determinar el Módulo de Elasticidad del concreto, se fabricaron 5 especímenes, dos de ellos se ensayaron a compresión de acuerdo a lo indicado en la NMX-C-083 con los que se calculó el esfuerzo máximo del concreto en condiciones normales de ensaye.
2. Con este resultado, se calculó el 40% de la carga máxima que soportan los cilindros y que es a la que se llegó en el ensayo de carga-deformación para determinar el Módulo de Elasticidad.
3. Para medir la deformación de los cilindros se empleó un dispositivo de dos anillos como se muestra en la imagen:



4. Se colocó el espécimen en una superficie horizontal plana y firme, donde se le montó el dispositivo de medición cuidando que al colocarlo en el espécimen, este quedara al centro de los anillo los que fueron fijados mediante los tornillos de punta para evitar deslizamientos.

5. Se verificó que los deformímetros quedaran verticales, paralelos al eje longitudinal del espécimen y que el vástago del micrómetro tuviera suficiente carrera para la deformación que se registraría y evitar daños al dispositivo como lo sugiere la **NMX-C-128**.



6. Una vez ajustados los micrómetros de los dos deformímetros, se retiraron cuidadosamente las barras que separan los anillos verificando que no existiera movimientos importantes en los anillo, de ser así se desarmaba y se montaba nuevamente.
7. Se colocó el espécimen en la máquina de prueba y se ajustó la caratula de los micrómetros en 0,0 (Cero).



8. Se aplicó la primer carga de 10% al 25% del promedio de la resistencia de ruptura de los primeros dos cilindros ensayados, para verificar el buen funcionamiento del dispositivo.
9. Se aplicó una segunda carga hasta el mismo nivel que la anterior y se retiró para verificar que los micrómetros regresaran a cero y de ser necesario verificar el centrado del espécimen o de los anillos.
10. Posteriormente de aplicó la carga de ensaye registrando la deformación a cada tonelada hasta llegar a cinco toneladas, después cada cinco toneladas hasta llegar al 40% de la carga máxima obtenida en el ensaye a compresión.

Nota: Debido a que no se debe interrumpir la carga en cada lectura tomada fue necesario contar con 3 personas para realizar la prueba.

11. Del ensayo se trazó la curva de esfuerzo- deformación, con el área del espécimen, las cargas, las lecturas de deformación y la longitud de medición (se tomó 12 cm), se calcularon los esfuerzos y las deformaciones unitarias correspondientes a cada carga y se trazó la curva correspondiente.
12. Se calculó el módulo de elasticidad empleando la siguiente fórmula:

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{e_2 - 0.000050}$$

Donde:

S_1 es el esfuerzo en kg/cm^2 correspondiente a la deformación unitaria e_1 de 0.000050

S_2 es el esfuerzo en kg/cm^2 correspondiente al 40% del esfuerzo máximo y

e_2 es la deformación unitaria correspondiente al esfuerzo S_2

5.2.3.3. Resistencia a la tensión por compresión diametral

La determinación de la Resistencia a la tensión por compresión diametral se realizó conforme a la norma Mexicana NMX-C-163-1997-ONNCCE.

1. Para cada prueba se contó con dos tiras de neopreno con un espesor de 3 mm y un ancho de 25 mm, aproximadamente y una longitud igual o ligeramente mayor que el espécimen. Las tiras de distribución de carga se colocan entre el espécimen y ambas placas de carga.
2. El dispositivo que se utilizó consta de un canal de acero con patines y una pieza vertical en la parte superior montada en los patines del canal.
3. Se centró una de las tiras de carga sobre la placa inferior. Se colocó el espécimen sobre la tira y se alineó. Se colocó la segunda tira de carga longitudinalmente sobre el cilindro y centrándolo.
4. Se colocó el conjunto en la máquina de ensaye.



5. Se aplicó la carga en forma continua sin impacto y a una velocidad constante hasta la falla del espécimen.



6. Se registró la carga máxima aplicada indicada por la máquina de prueba en el momento de la falla.
7. Se calculó la resistencia a la tensión por compresión diametral del espécimen con la siguiente expresión:

$$F_{c''T} = \frac{2P}{\pi LD}$$

Donde:

$F_{c''T}$ es la resistencia a la tensión por compresión diametral en kg/cm^2

P es la carga máxima aplicada en kg

L es la longitud en cm

D es el diámetro cm

5.2.3.4. Resistencia a la flexión



5.2.3.5. Velocidad de pulso



Finalmente se recopilaron los datos y resultados para su análisis y discusión.

5.3 Diseño experimental y análisis estadístico

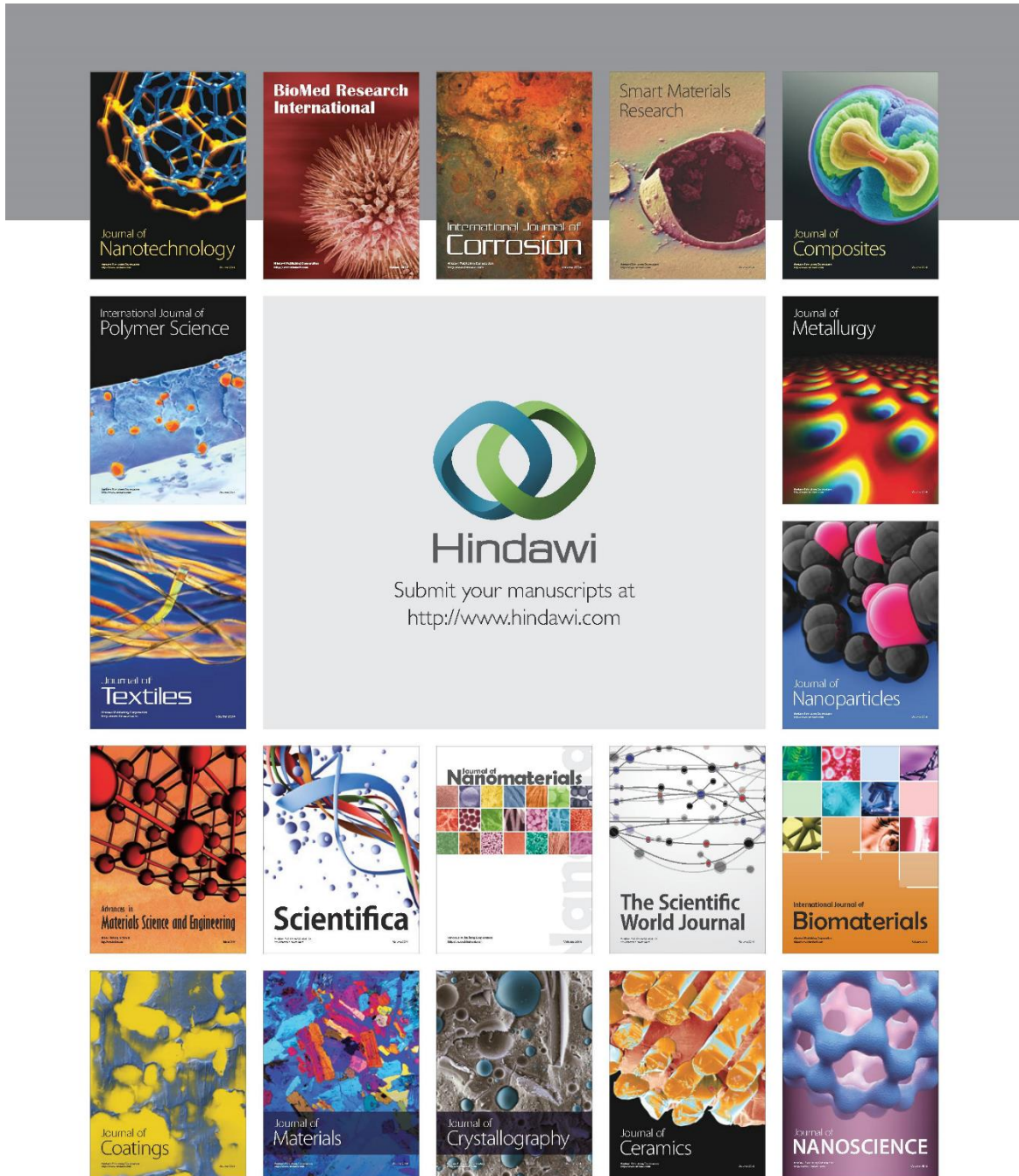
Se aplicó un diseño factorial de tipo 2^2 debido a que solamente existen dos niveles para cada factor (características del experimento que se pueden variar, en este caso tamaño de las partículas de llanta y la dosis de radiación) para obtener el nivel (bajo o alto) que optimiza la respuesta esperada.

La elección de un diseño factorial en la presente investigación se apoyó en su amplia utilización para las fases iniciales de cualquier trabajo experimental, particularmente cuando hay muchas variables por ser investigadas o cuando se desea optimizar procesos. Igualmente, porque se emplea en experimentos que involucran la medición de varios factores donde es necesario el estudio del efecto que éstos tendrán sobre una respuesta determinada. El más importante es el que tiene k factores cada uno con dos niveles que pueden ser cuantitativos o cualitativos; también se hace uso de él para especificar los niveles mínimo y máximo de un factor o bien, la presencia o ausencia del mismo. Una completa réplica de cada diseño requiere $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observaciones y es llamado diseño factorial 2^k .

El diseño factorial permitió que el efecto de todos y cada uno de los factores se estimara a través de un análisis de varianza (ANOVA), además de los efectos de la interacción entre ellos (Fontana, 1984; Kuehl, 2001; Montgomery, 2001; Walpole, 1999).

6. RESULTADOS

6.1. ARTÍCULO 1. (PUBLICADO)



Hindawi Publishing Corporation
Advances in Materials Science and Engineering
Volume 2014, Article ID 327856, 7 pages
<http://dx.doi.org/10.1155/2014/327856>



Research Article

Waste Tire Particles and Gamma Radiation as Modifiers of the Mechanical Properties of Concrete

Eduardo Sadot Herrera-Sosa,¹ Gonzalo Martínez-Barrera,²
Carlos Barrera-Díaz,³ and Epifanio Cruz-Zaragoza⁴

¹ *Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Paseo Colón Esquina Paseo Tollocan s/n, 50180 Toluca, MEX, Mexico*

² *Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, km 12 de la Carretera Toluca-Atlaconulco, San Cayetano, 50200 Toluca, MEX, Mexico*

³ *Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable, Universidad Autónoma del Estado de México, Universidad Nacional Autónoma de México (UAEM-UNAM), Carretera Toluca-Atlaconulco km 14.5, Unidad El Rosedal, 50200 Toluca, MEX, Mexico*

⁴ *Unidad de Irradiación y Seguridad Radiológica, Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, A.P. 70-543, 04510 Mexico City, DF, Mexico*

Correspondence should be addressed to Gonzalo Martínez-Barrera; gonzomartinez02@yahoo.com.mx

Received 15 November 2013; Accepted 27 January 2014; Published 6 March 2014

Academic Editor: Osman Gencel

Copyright © 2014 Eduardo Sadot Herrera-Sosa et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In polymer reinforced concrete, the Young's modulus of both polymers and cement matrix is responsible for the detrimental properties of the concrete, including compressive and tensile strength, as well as stiffness. A novel methodology for solving such problems is based on use of ionizing radiation, which has proven to be a good tool for improvement on physical and chemical properties of several materials including polymers, ceramics, and composites. In this work, particles of 0.85 mm and 2.80 mm obtained from waste tire were submitted at 250 kGy of gamma radiation in order to modify their physicochemical properties and then used as reinforcement in Portland cement concrete for improving mechanical properties. The results show diminution on mechanical properties in both kinds of concrete without (or with) irradiated tire particles with respect to plain concrete. Nevertheless such diminutions (from 2 to 16%) are compensated with the use of high concentration of waste tire particles (30%), which ensures that the concrete will not significantly increase the cost.

1. Introduction

The final disposal of used tires is a major environmental problem. In Mexico, it is estimated that only 10% of the 30 million disposed tires are recycled. The landfills where they are disposed represent a severe risk of fire and a health hazard due to the presence of noxious fauna such as rats, cockroaches, flies, and mosquitoes which can be infectious [1, 2].

The most common method to dispose waste tires is to burn them for vapor, heat, or electricity [3, 4]. The usage of waste tires as alternative fuel in cement furnaces is

generalized across the US and Europe [5]. However, these practices result in the generation of organic and inorganic compounds such as zinc oxide (ZnO) and zinc sulfide (ZnS), in hydrocarbon gas, aromatic volatile compounds, liquids formed by heavy and light oils, and all these byproducts which are highly polluting [6].

Another approach for the application of waste tires includes hot bituminous mixes as pneumatic dust for the agglutinative modification in asphalt pavements [7–9]. This application has been more or less effective, but not enough for reducing the reserves of waste tires, since these novel technologies are more expensive than conventional methods

[10]. An alternative option is to use them as substitute of fine or coarse aggregate in concrete. Their characteristics can improve mechanical properties of concrete as strength and modulus of elasticity, instead of those achieved by sand or stone.

Concrete is one of the most important materials in the construction industry around the world, not only for its cost, but also for its properties as well as its readiness for forming before it hardens which include resistance to climate and durability, among others. However, concrete has a great impact in the environment, it requires great amounts of natural resources for its production (sand, gravel, and water), and the cement generation produces large amounts of carbon dioxide which is discharged in the atmosphere. In fact, it is estimated that cement industry is responsible for the emission of one million tons of CO₂ to the atmosphere [11].

In order to reduce the ecological impact, many efforts have been made for reducing the consumption of nonrenewable resources in the production of concrete; one of these is the production or addition of recycled materials into the mixture in substitution of the common aggregates, taking care of the final quality, that include parameters as resistance, modulus of elasticity, and durability, among others [12].

When adding particles to concrete formation, internal stresses are produced and they promote sooner cracking and subsequent failure, which can be avoided with the control of the particle sizes. Early studies pointed out that elastomeric particles can reduce propagation of cracks, show increment in tensile strength, and have capacity in energy absorption [13].

One advantage of the rubber particles is concerning to energy absorption through to ultrasonic waves, in order to benefit the concrete elasticity. However, differences in the Young's modulus between rubber particles and concrete matrix, besides concentration of rubber particles into concrete, could promote great deformations when applying loads and thus progressive diminution of the mechanical properties. Other properties are concerning for concrete workability, including diminution of slump and increment of air content when increasing the elastomeric concentration, which promotes a low unit weight [14].

The use of recycled materials ensures that the product will not significantly increase in cost because is considered as waste, and there is not a specific final use for it. However, recycling of tire rubber is a practice currently industrialized which need follow the current regulations and avoid the pollution caused by a wrong disposal [15, 16].

The main aim of this study is the use of waste tire particles and gamma radiation for improvement of mechanical properties of concrete, which open several possibilities in research areas with great benefits, in order to ensure economic earnings in the context of sustainable development, by solving environmental pollution problems.

2. Experimental

2.1. Design and Manufacture of Concrete. All mixes were elaborate with Portland cement CPP-30R-RS (according to ASTM C 150 cement type II), natural sand, gravel, and water.

The objective with the mix of these components was obtained 24.5 MPa in compression strength at 28 days of curing, according to ACI 211.1 standard. Moreover, it was added waste tire particles of different sizes in function of the availability of the commercial mesh (sieve). In this case, 20 and 7 meshes correspond to 0.85 mm and 2.80 mm, respectively; thus, we have an approximate waste particle size ratio of 1:3.

Sieved of coarse aggregate (gravel) and fine aggregate (sand) was according to ASTM C136-06 standard. While the unit weight and the moisture content were according to ASTM C29/C29M-09 and ASTM C566-13, respectively, while the saturated surface-dry specific gravity, apparent specific gravity, and water absorption of gravel and sand were determined according to ASTM C127 and ASTM C128 standards.

Physical properties of the components are shown in Table 1. The sieve analyses of fine and coarse aggregates are shown in Tables 2 and 3.

2.2. Irradiation Procedure. Irradiation at 250 kGy of two different waste tire particle sizes (0.85 mm and 2.8 mm) was performed with an irradiator Gammabeam 651-PT loaded with ⁶⁰Co pencils, located at the Institute of Nuclear Sciences (ICN) of the National Autonomous University of Mexico. The irradiation rate was 4 kGy/h. After that the irradiated particles were mixing with concrete components, and finally the mix was casting in molds.

2.3. Mechanical Tests. Concrete specimens were tested after 28 days of curing time. Testing tolerance allowed was 28 days ± 12 hours according to ASTM C192 M-00 standard. Compressive strength evaluation was carried out in a universal testing machine Controls 047H4 (Milano, Italy) with capacity of 2000 kN, while flexural strength was carried out in an flexural testing machine Elvec 72-4 with capacity of 10 kN. The pulse velocity evaluation was carried out with an ultrasonic pulse velocity tester Controls 58E0048 with transmitter and receiver head (54 kHz) and pulse rate of 1/s.

2.4. Mixing, Casting, and Curing Specimens. The concrete mixtures were prepared in a laboratory mixer with capacity of 265 dm³. In the first stage dry aggregates (fine and coarse), waste tire particles, and cement were mixed with addition of 85% of water. In a second stage, after mixing by one minute, 15% of water was added. Finally, all batches were mixed for a total time of 5 minutes in order to prevent fresh concrete from segregation.

After mixing, the concrete specimens were molded. For each concrete mixture, ten specimens were casting in cylindrical molds of 150 mm diameter and 300 mm height, as well as two beams of 150 × 150 × 600 mm. After 24 hours, they were placed in a controlled temperature room at 23.0 ± 2.0 °C and 95% of relative humidity. Cured process was performed in accordance with ASTM C511 standard.

The component concentrations of the concrete are shown in Table 4. Regarding the manufactured concrete replacing sand by waste tire particles, two different waste tire particle sizes were used [2.8 mm (mesh 7) and 0.85 mm (mesh 20)], as

TABLE 1: Physical properties of components of concrete.

Component	Specific gravity (g/cm ³)	Water absorption (%)	Loose unit weight (kg/m ³)	Compact unit weight (kg/m ³)
Gravel	2.35	3.59	1367	1443
Sand	2.12	11.87	1278	1201
Tire rubber (2.80 mm)	1.04	—	—	—
Tire rubber (0.85 mm)	1.35	—	—	—
Cement	3.10	—	—	—
Water	1.00	—	—	—

TABLE 2: Sieve analysis of sand (fineness modulus = 3.7).

Sieve	Size (mm)	Retained (g)	% retained (individual)	% retained (cumulative)
4	4.75	81	4.07	4.07
8	2.36	212	10.66	14.74
16	1.18	285	14.34	29.07
30	0.60	402	20.22	49.30
50	0.30	671	33.75	83.05
100	0.15	312	15.69	98.74
Bottom tray		25	1.26	100.00

TABLE 3: Sieve analysis of gravel (maximum size = 40 mm).

Sieve	Size (mm)	Retained (g)	% retained (individual)	% retained (cumulative)
1	25.0	300	7.65	7.65
3/4	19.0	1200	30.61	38.27
1/2	12.5	1040	26.53	64.80
3/8	9.5	240	6.12	70.92
4	4.7	800	20.41	91.33
Bottom tray		340	8.67	100.00

well as three different concentrations of them: 10, 20, and 30% by volume. The mix code was labeled as Mix-Concentration-Mesh; for example, M10-7 specimens means "Mix with 10% of waste tire of mesh size 7". The water/cement ratio was kept constant at 0.54.

The unit weights of concretes are shown in Figure 1. For concretes with nonirradiated waste tire particles different behaviors are observed: (a) the values decrease progressively when adding higher concentration of tire particles. The lowest value is 9% minor with respect to concrete without tire particles (namely, "control concrete" by us). (b) All concretes have lower values with respect to control concrete (1954 kg/cm³). (c) The values for concrete with waste particles of 2.8 mm are higher than those with 0.85 mm. In fact the values decrease because waste tire particles are light, and since they have porous aggregates, air content is increased in concrete mixtures generating low unit weight. This fact agrees with a previous research in which the air content in concrete increases when using bigger rubber particles [17].

In the case of concretes with irradiated waste tire particles, different behaviors are noted. (a) The values decrease when the particle concentration increase. (b) At the difference of the results for concrete with nonirradiated particles, now the higher values are for concrete with tire particles of

0.85 mm. (c) All values are bigger than those for the control concrete. The highest value is 5% higher than those for control concrete.

When adding irradiated particles, the concrete shows a reduction in measures (contractions), which was observed during the calculus of volume. With higher particle sizes lower contractions were found in consequence lower unit weight.

3. Results

3.1. Compressive Strength. Compressive strength values of concretes are shown in Figure 2. The compressive strength values vary as a function of size and concentration of waste tire particles. For concrete with nonirradiated waste tire particles, the following behaviors are observed. (a) The values decrease progressively according to the particle concentrations which increase. For control concrete, the compressive strength is 24.1 MPa, which is bigger than those for all concrete (ranging from 5.2 to 21.4 MPa); being the highest value for concrete with 10% of particles of 2.8 mm, such value is 11% lower than those for control concrete. (b) With respect to the particle size, the compressive strength values are higher for concretes with particles of 2.8 mm than those with

TABLE 4: Components of concrete (1 m³).

Mix code	Waste tire (col%)	Waste tire (kg)	Portland cement (kg)	Sand (kg)	Gravel (kg)	Water (kg)
M0	0	0	337.1	758.5	662.6	286.3
M10-7	10	36.2	337.1	596.4	758.5	278.4
M20-7	20	72.4	337.1	530.1	758.5	270.6
M30-7	30	108.7	337.1	463.8	758.5	262.7
M10-20	10	47.2	337.1	596.4	758.5	278.4
M20-20	20	94.5	337.1	530.1	758.5	270.6
M30-20	30	141.7	337.1	463.8	758.5	262.7

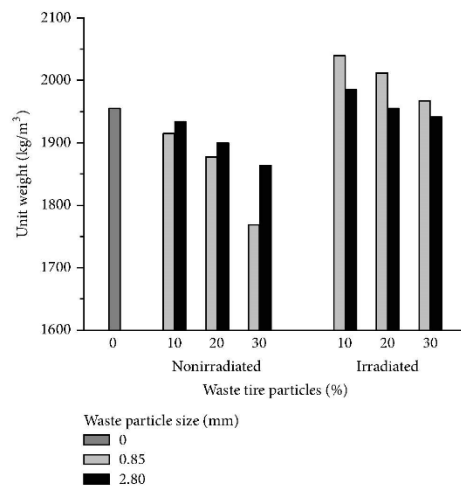


FIGURE 1: Unit weight of concrete with waste tire particles.

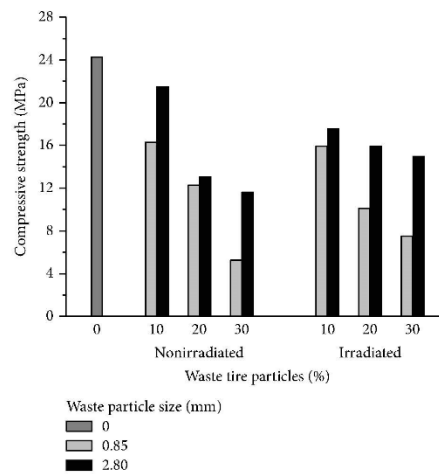


FIGURE 2: Compressive strength of concrete with waste tire particles.

0.85 mm. When increasing the waste particles concentration and adding large particles, more air content is obtained which may cause microcracking and in consequence lower compressive values.

For concrete with waste irradiated tire particles, the compressive strength values follow similar behaviors. (a) The values decrease when increasing the particle concentrations. The values range from 7.4 to 17.5 MPa; being the highest value for concrete with 10% of particles of 2.8 mm, such value is 27% lower with respect to control concrete. (b) The concretes with particles of 2.8 mm have bigger values than those with 0.85 mm. (c) The concretes with 20% or 30% of particles have higher values when comparing to concrete with nonirradiated particles. Thus, it is more convenient using bigger size particles instead of lower ones.

3.2. *Splitting Tensile Strength.* Splitting tensile strength values of concretes are shown in Figure 3. For concrete with nonirradiated waste tire particles, the following behaviors are observed. (a) The values decrease when increasing the

concentration of particles. The values vary from 0.7 to 1.8 MPa; being the highest value for concrete with 10% of particles of 2.8 mm, this value is 6% minor than those for control concrete. (b) Concretes with particles of 2.8 mm have higher values than those with 0.85 mm.

For concrete with irradiated waste tire particles, the splitting tensile strength also decreases when increasing the concentration of particles. The values range from 0.7 to 1.4 MPa; being the highest value for concrete with 10% of particles of 2.8 mm, it is 27% minor than those for control concrete. Moreover, higher values are seen for concrete with particles of 2.8 mm. As seen in Figure 1 for compressive strength values, in the case of tensile strength, a similar behavior is observed: the values for concrete with 20% or 30% of particles are higher than those for concrete with nonirradiated particles.

For both kinds of concrete, with irradiated or nonirradiated waste particles, the compressive and splitting tensile strength behavior is similar because the induced stresses

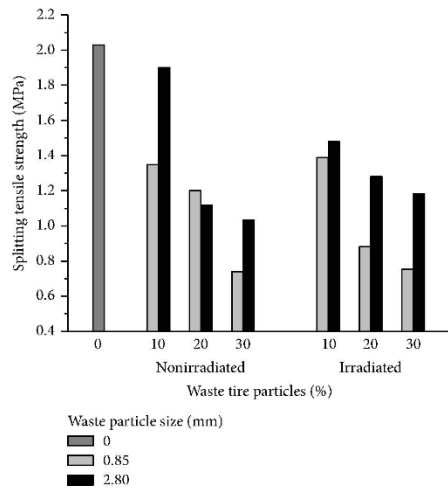


FIGURE 3: Splitting tensile strength of concrete with waste tire particles.

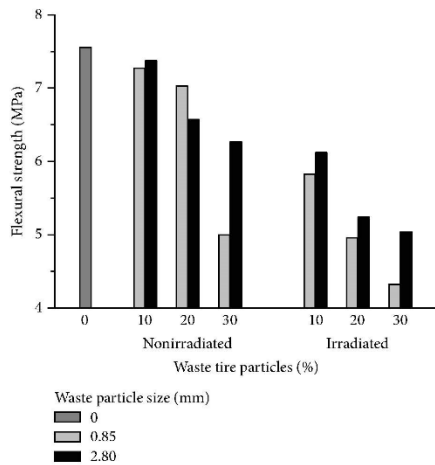


FIGURE 4: Flexural strength of concrete with waste tire particles.

generated in the specimens are of the same nature, they act in the direction of the load application axis.

3.3. Flexural Strength. The flexural strength values are shown in Figure 4. For concrete with nonirradiated waste particles, the values range from 4.9 to 7.3 MPa. The results indicate that (a) There is a progressive diminution of values when increasing the concentration of particles. The highest value is

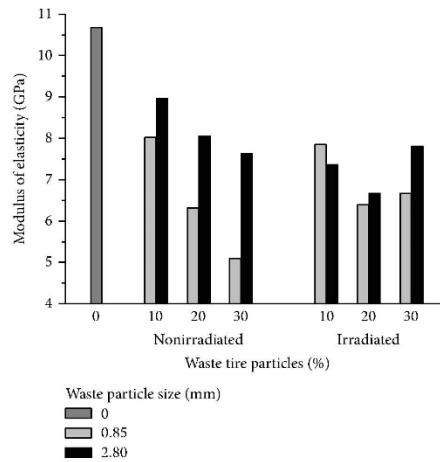


FIGURE 5: Modulus of elasticity of concrete with waste tire particles.

obtained by concrete with 10% of particles, which is 2% minor than those obtained for control concrete. (b) Variations in terms of the particle size are observed, and higher values are for concretes with 10% and 30% and particles of 2.8 mm for concrete with 20% but with particles of 0.85 mm.

For concrete with irradiated particles, the flexural strength values range from 4.3 to 6.1 MPa; such values are lower when comparing with concrete with nonirradiated particles. The flexural strength values decrease when increasing the concentration of particles; and the values are bigger for concretes with particles of 2.8 mm.

3.4. Modulus of Elasticity. The modulus of elasticity values is shown in Figure 5. The highest value corresponds to control concrete, namely, 10.6 GPa. For concrete with nonirradiated waste tire particles, the values range from 5.0 to 8.9 GPa. The highest value (obtained by concrete with 10% of particles of 2.8 mm) is 16% minor with respect to control concrete. As other mechanical features discussed in previous sections, the modulus of elasticity values follows similar behaviors. (a) The values decrease when increasing the concentration of particles. (b) Also, concrete with particles of 2.8 mm has higher modulus of elasticity values when comparing to those with 0.85 mm.

For concrete with irradiated particles, modulus of elasticity values ranges from 6.4 to 7.8 GPa, which are higher than those for concrete with nonirradiated particles. Special attention is taken on these concretes because variations in the modulus of elasticity are observed. (a) Two "stages" are identified: the first one consists in a diminution of the values for concretes with 10% and 20% of particles, and the second consists in an increment for concrete with 30% of particles. (b) In terms of the particle size, concrete with 10% of particles has the highest values when adding particles of 0.85 mm, and

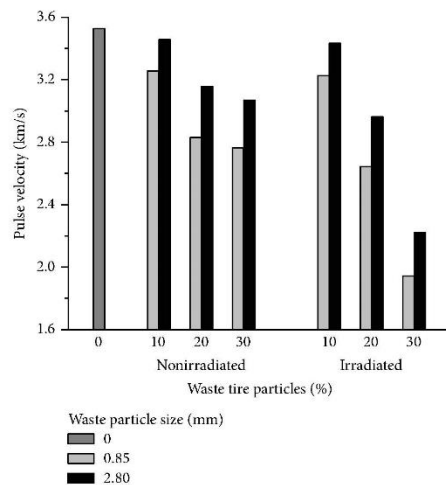


FIGURE 6: Pulse velocity of concrete with waste tire particles.

conversely highest values for concretes with 20% or 30% of particles are done when using particle sizes of 2.8 mm.

According to mechanical concepts, there is a correlation between the compressive strength and the modulus of elasticity values [18] and also between modulus of elasticity and the unit weight. In both cases, waste particles contribute to higher deformations, lower crack formation, and lower unit weights in concrete, which results in lower modulus of elasticity.

3.5. Pulse Velocity. In Figure 6 the ultrasonic pulse velocities of concrete are shown. The highest value corresponds to control concrete, namely, 3.5 km/s. For concrete with non-irradiated particles, the values range from 2.7 to 3.4 km/s; it means that the highest value is 2% minor with respect to control concrete. Moreover, the values follow the same behaviors. (a) The values decrease when increasing the concentration of waste tire particles. (b) The values are bigger for concrete with particles of 2.8 mm.

In the case of concrete with irradiated waste particles, the behavior does not change, and they follow the same behavior as concrete with nonirradiated particles.

4. Conclusions

The mechanical properties of concrete depend on the waste tire particle sizes and their concentration. Compressive and tensile strength values decrease due to waste tire particles, because they promote stress concentration zones, as well as generation of tensile stresses into concrete, resulting in a fast cracking and soon failure. Nevertheless, when applying gamma radiation to waste tire particles, in some cases, improvements on mechanical properties are found. Even so, it seems that the best option is, in all cases, for concrete with

10% of nonirradiated waste tire particles and size of 2.8 mm. Concrete with irradiated particles can support up to 30% of tire particles, making it possible to reduce the final cost of the concrete.

Conflict of Interests

The authors do not have a direct financial relation or conflict of interests with the commercial identities mentioned in this submitted paper, and the commercial trademarks such as Controls and Elvec only were reported to guarantee the reproducibility, in the same conditions, of the different tests.

Acknowledgments

The authors acknowledge the National Council for Science and Technology of México (CONACYT) for the scholarship support for Eduardo Sadot Herrera-Sosa for the achievement of this research and the Environmental Sciences Graduate Program of Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM).

References

- [1] R. K. Dhir, M. C. Limbachiya, and K. A. Paine, *Recycling and Use of Tyres*, Thomas Telford, London, UK, 2001.
- [2] M. R. Taha, A. S. El-Dieb, and M. Nehdi, "Recycling tire rubber in cement-based material," *Concrete With Recycled Materials*, ACI Committee 555, 2008.
- [3] H. Briodsky, "The important role retreads can play in reducing the scrap tyre problem," in *Recycling and Use of Tyres*, R. K. Dhir, M. C. Limbachiya, and K. A. Paine, Eds., pp. 57–62, Thomas Telford, London, UK, 2001.
- [4] K. M. Brown, R. Cummings, J. R. Mrozek, and P. Terrebbonne, "Scrap tire disposal: three principles for policy choice," *Natural Resources Journal*, vol. 41, no. 1, pp. 9–22, 2001.
- [5] R. W. Davies and G. S. Worthinton, "Use of scrap tyre as a fuel in the cement manufacturing process," in *Recycling and Use of Tyres*, R. K. Dhir, M. C. Limbachiya, and K. A. Paine, Eds., pp. 93–106, Thomas Telford, London, UK, 2001.
- [6] R. Mis-Fernandez, J. A. Azamar-Barrios, and C. R. Rios-Soberanis, "Characterization of the powder obtained from wasted tires reduced by pyrolysis and thermal shock process," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 6, pp. 95–105, 2008.
- [7] S. N. Amirghanian, "Utilization of crumb rubber in asphaltic concrete mixtures-south Carolinas's experience," Research Report, South Carolina Department of Transportation, 2001.
- [8] E. J. Navarro, P. Partal, F. Martínez-Boza, and C. Gallegos, "Influence of crumb rubber concentration on the rheological behavior of a crumb rubber modified bitumen," *Energy and Fuels*, vol. 19, no. 5, pp. 1984–1990, 2005.
- [9] R. G. Nelson and A. S. M. M. Hossain, "An energetic and economic analysis of using scrap tyres for electricity generation and cement manufacturing," in *Recycling and Use of Tyres*, R. K. Dhir, M. C. Limbachiya, and K. A. Paine, Eds., pp. 119–127, Thomas Telford, London, UK, 2001.
- [10] C.-T. Chiu, "Use of ground tire rubber in asphalt pavements: field trial and evaluation in Taiwan," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 52, no. 3, pp. 522–532, 2008.

- [11] V. M. Malhotra, "Role of supplementary cementing materials in reducing greenhouse gas emissions," in *Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century*, O. E. Gjorv and K. Sakai, Eds., pp. 226–235, E & FN Spon, London, UK, 2000.
- [12] C. Meyer, "Concrete as a green building material," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Construction Materials (ConMat '05)*, Vancouver, Canada, 2005.
- [13] G. L. Nacif, T. H. Panzera, K. Streckler, A. L. Christoforo, and K. Paine, "Investigations on cementitious composites based on rubber particle waste additions," *Materials Research*, vol. 16, pp. 259–268, 2013.
- [14] R. Siddique and T. R. Naik, "Properties of concrete containing scrap-tire rubber—an overview," *Waste Management*, vol. 24, no. 6, pp. 563–569, 2004.
- [15] J. Karger-Kocsis, "Waste tyre rubber—what to do next?" *eXPRESS Polymer Letters*, vol. 7, p. 406, 2013.
- [16] C. R. Rios-Soberanis, S. Wakayama, T. Sakai, J. A. Rodriguez-Laviada, and E. Pérez-Pacheco, "Manufacture of partially biodegradable composite materials based on PLA-Tires powder: process and characterization," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2013, Article ID 514951, 8 pages, 2013.
- [17] G. Skripkiunas, A. Grinys, and M. Dauksys, "Using tires rubber waste for modification of concrete properties," in *Sustainable Construction Materials and Technologies*, Y. M. Chun, P. Claisse, T. R. Naik, and E. Ganjian, Eds., pp. 85–90, Taylor & Francis, London, UK, 2007.
- [18] American Concrete Institute Committee 318: ACI 318-05/318R-05, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary," 2005.

6.2. CAPÍTULO DE LIBRO (PUBLICADO)

Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción

Editores:

Dr. Gonzalo Martínez Barrera, Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Dra. Teresa López Lara, Dra. Carmina Menchaca Campos



@omniaScience

Monographs



Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción

Editores:

Gonzalo Martínez Barrera
Juan Bosco Hernández Zaragoza
Teresa López Lara
Carmina Menchaca Campos

Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción

1ra edition © 2015 OmniaScience (Omnia Publisher SL)

www.omniascience.com

Editores:

Gonzalo Martínez Barrera

Juan Bosco Hernández Zaragoza

Teresa López Lara

Carmina Menchaca Campos

gonzomartinez02@yahoo.com.mx

ISBN: 978-84-943418-0-9

DL: B-8093-2015

DOI: <http://dx.doi.org/10.3926/oms.211>

© OmniaScience (Omnia Publisher SL) 2015

Diseño de cubierta: OmniaScience

Fotografía cubierta: © Cité verte, Auguste Lange - Fotolia.com

OmniaScience no se hace responsable de la información contenida en este libro y no aceptará ninguna responsabilidad legal por los errores u omisiones que puedan existir.

Índice

INTRODUCCIÓN	7
PRÓLOGO	9
CAPÍTULO 1. USO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA ESTABILIZACIÓN DE ADOBES <i>Juan Jesús Zavala Ramírez, Francisco Javier García Rodríguez, Hugo Carrillo-Rodríguez, Jaime Navarrete-Damián, Juan Bosco Hernández-Zaragoza, Teresa López-Lara.....</i>	11
CAPÍTULO 2. MORTERO REPARADOR BASE POLIÉSTER Y SU USO EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO DAÑADAS <i>Juan Bosco Hernández-Zaragoza, José Delgado-Hernández, Teresa López-Lara, Carlos López-Cajún, Rene Delgado-Salgado, Edgar García-Hernández.....</i>	31
CAPÍTULO 3. CERÁMICOS DE RECICLAJE COMO SISTEMAS INTELIGENTES DE PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN <i>Lizeth Concha-Guzmán, Estela Sarmiento-Bustos, Carmina Menchaca-Campos, Jorge Uruchurtu-Chavarín.....</i>	43
CAPÍTULO 4. USO DE MATERIALES RECICLADOS PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y ELECTROQUÍMICAS DE CONCRETO REFORZADO <i>Sandra Viveros-Aguirre, Ibeth Rivera-Ortíz, Alberto Álvarez-Castillo, Carmina Menchaca-Campos, Jorge Uruchurtu-Chavarín.....</i>	61
CAPÍTULO 5. MATERIALES RECICLADOS DE LLANTAS AUTOMOTRICES Y LA RADIACIÓN GAMMA EN EL MEJORAMIENTO DEL CONCRETO <i>Eduardo Sadot Herrera-Sosa, Gonzalo Martínez-Barrera, Carlos Eduardo Barrera-Díaz, Epifanio Cruz-Zaragoza.....</i>	73
CAPÍTULO 6. PET DE DESECHO Y SU USO EN CONCRETO <i>Liliana Ivette Ávila Córdoba, Gonzalo Martínez-Barrera, Carlos Eduardo Barrera-Díaz, Fernando Ureña Nuñez, Alejandro Loza Yáñez.....</i>	95
CAPÍTULO 7. MATERIALES PROVENIENTES DEL RECICLAMIENTO DE ENVASES DE TETRA PAK Y SU USO EN CONCRETO <i>Miguel Martínez-López, Gonzalo Martínez-Barrera, Carlos Eduardo Barrera-Díaz, Fernando Ureña-Nuñez.....</i>	123
SOBRE LOS EDITORES.....	145

Capítulo 5 Índice

Materiales Reciclados de Llantas Automotrices y la Radiación Gamma en el Mejoramiento del Concreto

Eduardo Sadot Herrera-Sosa¹, Gonzalo Martínez-Barrera², Carlos Barrera-Díaz¹, Epifanio Cruz-Zaragoza³

¹Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable, Universidad Autónoma del Estado de México – Universidad Nacional Autónoma de México (UAEM-UNAM), Carretera Toluca-Atlaconulco, km 14.5, Unidad El Rosedal, C.P. 50200, Toluca, Edo. de México, México.

²Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Km.12 de la carretera Toluca-Atlaconulco, San Cayetano 50200, México.

³Unidad de Irradiación y Seguridad Radiológica, Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, A.P. 70-543, 04510, D.F. México.

sadoths@yahoo.com.mx, gonzomartinez02@yahoo.com.mx,
cbd0044@yahoo.com, ecruz@nucleares.unam.mx

Doi: <http://dx.doi.org/10.3926/oms.245>

Referenciar este capítulo

Herrera-Sosa, E.S., Martínez-Barrera, G., Barrera-Díaz, C., & Cruz-Zaragoza, E. (2015). Materiales reciclados de llantas automotrices y la radiación gamma en el mejoramiento del concreto. En Martínez Barrera, G., Hernández Zaragoza, J.B., López Lara, T., & Menchaca Campos, C. (Eds.). *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción*. Barcelona, España: OmniaScience. pp. 73-93.

E.S. Herrera-Sosa, G. Martínez-Barrera, C. Barrera-Díaz, E. Cruz-Zaragoza

1. Introducción

El reciclaje de llantas es un serio problema para el ambiente, se estima que en México de los 30 millones de llantas que se desechan, solo el 10% se recicla. Los tiraderos de llantas no solo son antiestéticos y sitios de riesgo de incendios, sino que además representan un riesgo a la salud como criaderos de fauna nociva como ratas, cucarachas, moscas y mosquitos, que pueden propagar enfermedades. Algunos incendios de estos tiraderos pueden durar meses y hasta años (Taha, El-Dieb & Nehdi, 2008; Dhir, Limbachiya & Paine, 2001) por lo cual el desecho de llantas en rellenos sanitarios es a menudo prohibido. En consecuencia se ha incrementado el número de tiraderos ilegales con los consecuentes problemas ambientales y de salud, ya que en caso de producirse incendios se contamina el aire, lo vuelve tóxico, contamina los mantos freáticos del subsuelo; además estos sitios se convierten en criaderos de fauna nociva (roedores, cucarachas, víboras, arañas, alacranes, mosquitos, etc.), portadores de enfermedades o que representan un peligro a los seres humanos, así mismo contribuyen al deterioro de la imagen urbana.

Probablemente el método más utilizado de reciclaje de llantas es el reúso de estas después del destalonamiento (remoción de los alambres de acero). Son grandes las limitantes en torno a la reutilización de las llantas (Brown, Cumming, Morzek & Terrebonne, 2011; Briodsky, 2001). El método más común de desecho de llantas es quemarlas para la producción de vapor, electricidad o calor. El uso de llantas como combustible alternativo en hornos de cemento es generalizado en todo Estados Unidos y Europa (Davies & Worthinton, 2001). Pero el costo como combustible es considerablemente menor que el material original, lo cual constituye un buen ejemplo de down-cycling, que es el proceso por el cual al recuperar un material para su reutilización, se hace en un producto de menor valor o se compromete la integridad del material a través del proceso de recuperación, lo que significa que no puede ser utilizado en la fabricación del producto original. Otro uso para la reutilización de llantas es en mezclas bituminosas en caliente como polvo de llanta para la modificación de aglutinantes en los pavimentos de asfalto (Nelson & Hossain, 2001; Amirkhanian, 2001; Navarro, Partal, Martínez-Boza & Gallegos, 2005).

Actualmente la industria del renovado ha tenido avances significativos en el proceso de reciclaje de llantas, logrando la separación de los tres componentes básicos: fibra textil, acero y elastómero. Estos dos últimos tienen diversas aplicaciones en la industria de la construcción como en pavimentos, carreteras y estructuras. En general, son agregados al concreto para modificar sus propiedades.

El concreto es uno de los materiales más importantes dentro de la industria de la construcción, esto se debe no solo a su costo sino a las propiedades que presenta como su fácil colocación antes del fraguado, su resistencia al intemperismo, su durabilidad y resistencia. Debido a esto su uso es muy popular alrededor del mundo, sin embargo su empleo tiene un gran impacto en el medio ambiente, en primer lugar, se requieren de una gran cantidad de recursos naturales para su fabricación (arena, grava y agua), además la producción del Cemento Portland genera dióxido de carbono que es liberado a la atmósfera, se estima que la industria cementera es la responsable de la emisión de una tonelada de CO₂ al año a nivel mundial (Malhotra, 2000).

En aras de reducir el impacto ecológico que esto conlleva, se han hecho esfuerzos por disminuir el consumo de recursos naturales no renovables en la fabricación del concreto. Una opción viable para la solución al problema causado por llantas de desecho es el reúso del elastómero de llanta en el concreto como sustituto del agregado fino o grueso, procurando la calidad del

producto y de ser posible buscar el incremento de las propiedades deseables como la resistencia, el módulo de elasticidad y la durabilidad.

2. Llantas Automotrices

En épocas prehispánicas, los pobladores de América central y del Sur utilizaban látex líquido que brotaba del árbol, el cual secaban y hervían en agua hasta formar una masa blanda y gomosa con la que hacían pelotas. Esta goma era dura, elástica y podía cortarse, mientras estuviera seca; pero no podía ser extendida sobre objetos.

Durante el siglo XVIII se encontró que era mejor usar el látex natural, ya que se podía extender con facilidad y al secarse dejaba una capa de goma pura, fuerte, flexible e impermeable. Tiempo después, se descubrió que un compuesto de hidrocarburos podía disolver la goma solidificada, la que al regresar a su estado sólido, podía ser amasada y machacada más fácilmente que la original. Fue en el siglo XIX cuando se descubrió que al mezclar la goma con azufre y ser calentada, esta endurecía y tomaba la calidad del cuero, sin disolverse con tanta facilidad con petróleo ni con otras soluciones, además de ser resistente al calor, a dicho proceso se le llamó vulcanización.

La fabricación de llantas automotrices se divide en tres etapas: a) En la primera, se elabora un modelo por computadora, que contiene el talón, el cinturón y la carcasa de la llanta. Posteriormente, se determina el proceso de fabricación, los materiales y las cantidades a emplear; b) Durante la segunda etapa, se elige la mezcla y el dibujo de la banda de rodadura, para fabricar llantas con cortes a mano. Los cuales son examinados en laboratorio y sometidos a pruebas de resistencia mecánica, térmica (desde -40°C hasta 50°C) y química; c) La tercera etapa es la fabricación en serie y consta de tres partes.

Primera etapa: denominada mezcla de gomas (Tabla 1), en esta el hule se mezcla con emulgentes y el negro de humo, para llevar a cabo la polimerización. El negro de humo es fabricado a partir de aceite y gas quemado. El aceite ayuda en la adherencia y hace que la mezcla sea blanda. En la fase de vulcanización, el azufre procura que las cadenas de moléculas de hule formen redes, para después obtener goma elástica.

Sustancias	%
Hule	48
Negro de humo	25
Aceite	12
Productos Químicos	4
Azufre	1
Otros	10

Tabla 1. Porcentaje de sustancias en la mezcla de goma

E.S. Herrera-Sosa, G. Martínez-Barrera, C. Barrera-Díaz, E. Cruz-Zaragoza

Segunda etapa: mediante el uso de acero y fibras sintéticas, se obtiene la carcasa, los núcleos de talón y las capas del cinturón radial. En el caso de la carcasa se cablean las fibras textiles artificiales, normalmente de rayón y se transforma en un cordón que junto con el acero se colocan a cierto ángulo. Posteriormente se recubren los cables con hule, se añade el cinturón de acero y más tarde se coloca la banda continua.

Tercera etapa: denominada de vulcanización, en la cual la llanta obtiene su aspecto definitivo; consiste en aplicar una temperatura entre 150 y 170°C a alta presión, haciendo que las cadenas de hule sean reticuladas. Finalmente, la llanta en bruto se prensa en moldes, aplicando presión de vapor o gas inerte (nitrógeno) de 12 hasta 24 atmósferas, para poder grabar el dibujo de la llanta durante un tiempo de 10 a 12 minutos.

Los diferentes tipos de llantas se diferencian por el porcentaje de los elementos químicos y los materiales que las constituyen (Tablas 2 y 3).

Elemento	%
Carbono, C	70
Fierro, Fe	15
Hidrógeno, H	7
Dióxido de Silicio, SiO ₂	5
Óxido de Zinc, ZnO	2
Azufre, S	1-3
Cloro, Cl	0.2-0.6
	(ppm)
Plomo, Pb	60-760
Níquel, Ni	77
Cadmio, Cd	5-10
Cromo, Cr	9-7
Talio, Tl	0.2-0.3

Tabla 2. Composición química de la llanta

Tipo de llanta	Hule estireno-butadieno (SBR) (%)	Hule Natural (NR) (%)	Alambres de acero "armónico" (%)	Fibras textiles (%)
Automóvil	70	-	15	15
Camiones de transporte	-	70	29	1
Maquinaria para excavación	70	-	15	15
Maquinaria agrícola	-	70	5	25

Tabla 3. Materiales que componen los diferentes tipos de llantas

Los copolímeros estireno-butadieno (S-B) son los hules sintéticos que han sustituido prácticamente en su totalidad al hule natural, su composición más común es de 25% de estireno y 75% de butadieno; sus aplicaciones incluyen en orden de importancia: Llantas, espumas, empaques, suelas para zapatos y mangueras.

2.1. Proceso de Reciclaje de Llantas

Mientras países europeos como Alemania, Francia, Austria reciclan hasta el 60% de sus llantas usadas, en México prácticamente no existe tal reciclado, debido a la escasa conciencia ambiental y a un inexistente sistema de control. De los aproximadamente 30 millones de llantas que se desechan anualmente en México, el 91% terminan en lotes baldíos, ríos y carreteras (Figura 1). Varios estudios han demostrado que la quema de llantas libera sustancias de máxima peligrosidad para el ser humano, tales como monóxido de carbono, furanos, tolueno, benceno y óxido de plomo (US Environmental Protection Agency, 1997).

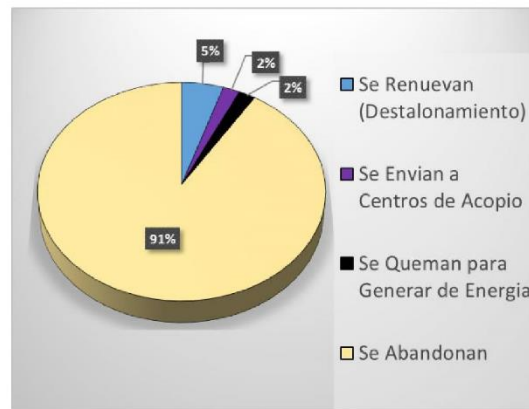


Figura 1. Disposición de llantas de desecho en México
(Adaptado de Instituto de Investigaciones en Materiales-UNAM)

El reciclaje, se define como la obtención de materiales a partir de desechos, mediante el empleo de procesos fisicoquímicos o mecánicos, donde se somete un producto ya utilizado, a un tratamiento total o parcial para obtener una materia prima diferente o un nuevo producto, introduciéndolo de nuevo en el ciclo de vida útil. Las tecnologías para el reciclaje se implementan ante la perspectiva del agotamiento de recursos naturales en un sentido macro económico y para eliminar de forma eficaz los desechos.

El reciclaje se inscribe en la estrategia de tratamiento de residuos de las "Tres R":

- Reducir: acciones para disminuir la producción de objetos susceptibles de convertirse en residuos.
- Reutilizar: acciones que permiten el volver a usar un producto para darle una segunda vida, con el mismo uso u otro diferente.
- Reciclar: el conjunto de operaciones de recogida y tratamiento de residuos que permiten reintroducirlos en un ciclo de vida (Greenpeace, 2011).

E.S. Herrera-Sosa, G. Martínez-Barrera, C. Barrera-Díaz, E. Cruz-Zaragoza

Para reciclar los materiales que conforman las llantas, es necesario que estas se sometan a los siguientes procesos:

- a) Destalonamiento: es la remoción de los alambres de acero “armónico”.
- b) Desmetalizado (separación magnética del acero “armónico”): se emplea para remover las partículas ferromagnéticas de los demás materiales. Se remueve el 99% del acero “armónico” por medio de un separador magnético.
- c) Trituración: es la reducción volumétrica de la llanta entera a trozos más pequeños; esta operación está compuesta por dos fases: la trituración primaria y la trituración secundaria. En la trituración primaria se logran obtener grandes trozos de llantas de tamaño no uniforme. Mientras que en la trituración secundaria se reducen los trozos en pedazos aún más pequeños, que varían entre 20 mm y 100 mm.
- d) Granulación primaria: es la reducción volumétrica de los trozos de llantas en granos, provenientes de las fases de trituración. Se obtienen tamaños menores a 20 mm.

Por motivos de eficiencia, el material no debe entrar en un granulador si primero no ha sido reducido con el triturador a un tamaño de 20 mm. Si el material granulado (granos de tamaño hasta de 20 mm) no contiene material textil, se separan por tamaños en una criba con tres diferentes orificios (Diámetros de 1 a 17 mm). Entre más pequeño e uniforme se logre obtener el grano, mayor será su valor en el mercado.

- e) Granulación secundaria: Si el material granulado contiene material textil, será conducido a una sucesiva fase de granulación para separar la tela de la goma, esta fase se llama granulación secundaria o de ‘refinación’. Una vez molidos los granos se separan con una criba de tres diferentes tamaños, dependiendo del tamaño de que se requiera obtener y de los tamaños de criba utilizada, estos oscilan entre 0.5 mm y 3 mm (Figura 2).
- f) Durante el proceso de granulado se produce una fracción de polvo de tela y de elastómero, así que por motivos vinculados al ambiente, estas pequeñas partículas deben ser aspiradas por medio de un sistema de aspiración de polvos formado por: el ciclón reductor de polvos, electroaspirador, rotoválvulas, filtro de mangas y las respectivas tubaciones.

Al final se logra la separación de las llantas en cuatro componentes: Partículas de 0.5 mm a 3 mm, fibras textiles, polvos y alambre de acero “armónico”.

Materiales reciclados de llantas automotrices y la radiación gamma en el mejoramiento del concreto

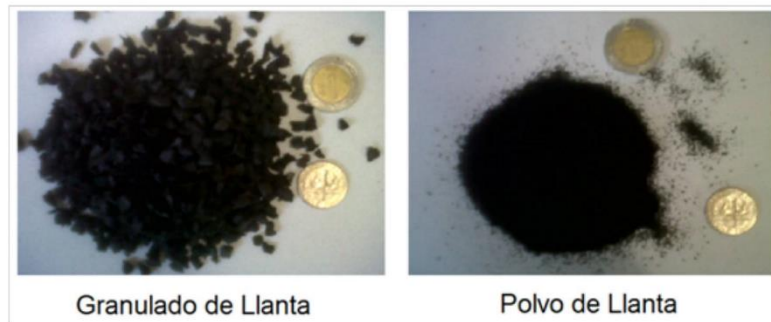


Figura 2. Partículas de llanta

Otra alternativa para el tratamiento de llantas de desecho es la pirólisis, que consiste en la descomposición térmica de las cadenas poliméricas en ausencia de oxígeno; en el caso de las llantas de desecho, primero se lleva a cabo la trituration y posteriormente se introducen las partículas de llanta en hornos con temperaturas entre 600 y 800°C en ausencia de oxígeno, esto con el fin de descomponerlos y obtener productos de menor peso molecular (líquidos, gases y carbón residual). Estos productos pueden ser útiles como combustibles o materias primas para otros procesos (Yang, Kaliaguine & Roy, 1993).

3. Concreto

El concreto es la mezcla de agregados finos y gruesos con una pasta cementante compuesta de cemento Portland y agua, que al fraguar forman una masa monolítica semejante a la roca. La pasta se endurece debido a la reacción química entre el agua y el cemento Portland, generando productos de hidratación.

Los agregados finos son arenas naturales o sintéticas con tamaños máximos de hasta 10 mm y los agregados gruesos son rocas o gravas con tamaños máximos de hasta 152 mm. Ambos agregados constituyen entre el 60 y 75% del volumen total de la mezcla, por lo tanto pueden limitar las propiedades del concreto e influir en su desempeño. Sin embargo, estas propiedades dependen mayormente de la calidad de la pasta formada por el agua y el cemento, así como de la afinidad que tengan con los agregados y su capacidad de trabajar en conjunto.

Una de las mayores propiedades del concreto recién mezclado, es ser plástico, semifluido y poder adquirir prácticamente cualquier forma por medio de moldes. Durante su estado fresco, puede fluir como un líquido viscoso en el que hay muy poco o ningún contacto entre los agregados, característica que prevalece aun en el concreto ya endurecido.

Inmediatamente después del mezclado de los materiales, la reacción química que se genera propicia el paulatino endurecimiento del concreto, lo que incrementa su resistencia con la edad, siempre y cuando se presente una humedad y temperatura favorable para la hidratación del cemento.

E.S. Herrera-Sosa, G. Martínez-Barrera, C. Barrera-Díaz, E. Cruz-Zaragoza

Una propiedad física fundamental y tal vez la más importante del concreto en estado endurecido, es su resistencia a la compresión (carga máxima que puede soportar por unidad de área). Este índice es utilizado en el cálculo, diseño y elaboración de las mezclas que se emplearán para fabricar elementos que formarán parte de las estructuras.

Además, la resistencia a compresión puede ser utilizada para estimar la resistencia a otros esfuerzos como la flexión, torsión y cortante, ya que estos guardan una correlación establecida empíricamente para el análisis estructural y que depende directamente de la calidad y características de los componentes del concreto, así como de las condiciones ambientales durante su tiempo de vida.

Dentro de los principales factores que determinan la resistencia se encuentran: la edad del concreto, la relación agua-cemento de la mezcla, el grado de compactación de los agregados en el concreto, la porosidad y el contenido de aire atrapado al momento de fabricar el concreto. Otras variables que intervienen en el cálculo de la resistencia son la relación agregado-cemento, la calidad del agregado (granulometría, textura superficial, forma, resistencia, rigidez y el tamaño nominal).

El cemento Portland es obtenido de la mezcla de materiales calcáreos (piedra caliza o yeso), sílice, alúmina y óxido de hierro. Los principales componentes químicos del cemento Portland son Silicato tricálcico $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S), Silicato dicálcico $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S), Aluminio tricálcico $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) y Aluminoferrito $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_3S) (Neville & Brooks, 1998).

Los silicatos tricálcico (C_3S) y dicálcico (C_2S) son los causantes de la resistencia de la pasta del cemento, ya que al hidratarse forman silicatos hidratados de calcio (S-H-C) además de constituir aproximadamente el 75% del peso del cemento. El silicato tricálcico (C_3S) aporta la resistencia a corto plazo mientras que el silicato dicálcico (C_2S) aporta la resistencia a mediano y largo plazo. El aluminato tricálcico (C_3A) es el compuesto con mayor rapidez de hidratación pero con menor contribución a la resistencia, excepto en las primeras etapas, ya que propicia una mayor velocidad en el fraguado pero su presencia hace al concreto susceptible al ataque de los sulfatos, debido a la formación de sulfo-aluminatos que genera resquebrajamiento. Aun así, es necesario para propiciar la mezcla de sílice y cal durante la fabricación del clinker. El aluminoferrito tetracálcico (C_4AF) se requiere para la formación de sulfo-ferrita de calcio cuando reacciona con el yeso, su presencia es útil como fundente durante la calcinación del clinker y favorece a la hidratación de los demás componentes.

En la composición química del clinker se presentan los álcalis: óxidos de sodio (Na_2O) y de potasio (K_2O) cuyo contenido debe ser limitado y controlado para evitar la desintegración del concreto. Otros compuestos que representan un porcentaje mucho menor son los óxidos de: magnesio (MgO), manganeso (Mn_2O_3), dipotasio (K_2O), sodio (Na_2O) y el dióxido de titanio (TiO_2), como se muestra en la Tabla 2.

El cemento presenta la composición: CaO (60 – 67%), SiO_2 (17 – 25%), Al_2O_3 (3 – 8%), Fe_2O_3 (0.5 – 6.0%), MgO (0.1 – 4.0%), Alcalinos (0.2 – 1.3%), SO_3 (1 – 3%) (Neville & Brooks, 1998).

Materiales reciclados de llantas automotrices y la radiación gamma en el mejoramiento del concreto

Cemento Portland (Tipo)	Composición química (%)						Pérdida por ignición (%)	Residuo insoluble (%)	Composición potencial de los compuestos (%)				Finura Blaine (m ² /kg)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃			C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
I	20.9	5.2	2.3	64.4	2.8	2.9	1.0	0.2	55	19	10	7	370
II	21.7	4.7	6.3	63.6	2.9	2.4	0.8	0.4	51	24	6	11	370
III	21.3	5.1	2.3	64.9	3.0	3.1	0.8	0.2	56	19	10	7	540
IV	24.3	4.3	4.1	62.3	1.8	1.9	0.9	0.2	28	49	4	12	380
V	25.0	3.4	2.8	64.4	1.9	1.6	0.9	0.2	38	43	4	9	380
Blanco	24.5	5.9	0.6	65.0	1.1	1.8	0.9	0.2	33	46	14	2	490

Tabla 4. Composición química y finura de los cementos tipo I, II, III, IV, V y Blanco

Las propiedades físicas más estudiadas en el cemento son: la finura, el tiempo de fraguado, el falso fraguado, el peso específico, y el calor de hidratación. Por medio de difracción de rayos X (XRD) se pueden determinar la composición química de los diferentes tipos de cemento y de la cantidad de los componentes.

Los materiales agregados, gruesos y finos, constituyen entre el 60 y 75% del volumen (o entre el 75 y 85% del peso) total de la mezcla de concreto. Los agregados pueden ser naturales o triturados. Los naturales, como la grava o la arena se excavan de alguna mina o cantera. Mientras que agregados triturados se producen mediante la trituración de rocas de cantera, piedras tipo bola, guijarros o grava de gran tamaño.

Las rocas se clasifican en: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Las *rocas ígneas* contienen feldespatos (50%), cuarzo (30 a 40%) y mica (10 a 20%). Mientras que las *rocas sedimentarias* carbonato de calcio y magnesio. Las *rocas metamórficas* se forman por la transformación de las rocas ígneas y sedimentarias bajo la acción de la temperatura y presión.

Los áridos son arenas o gravillas procedentes de rocas naturales o artificiales. Los áridos se clasifican en: áridos rodados, áridos de machaqueo, áridos artificiales y áridos especiales. Los *áridos artificiales* más usados en la construcción son escorias de alto horno con expansión baja, escorias de hulla, las cenizas aglomeradas, restos de tejas y ladrillos, arcillas y esquistos expandidos como la perlita y la vermiculita, las virutas y las fibras. Los *áridos especiales* son áridos pesados como la barita, la magnetita, la limonita, la hematita, el hierro, se utilizan para fabricar concreto para blindaje anti-radiación.

Los agregados deben cumplir con determinados requisitos para que su empleo sea permitido en la fabricación de concreto. Las partículas deben ser durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos, arcilla y otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia con la pasta de cemento.

Las características de los agregados son: la granulometría; forma y textura de las partículas; masa volumétrica y vacíos; masa específica; resistencia al desgaste y al agrietamiento; resistencia y contracción.

E.S. Herrera-Sosa, G. Martínez-Barrera, C. Barrera-Díaz, E. Cruz-Zaragoza

4. Concreto Reforzado con Partículas de Llantas

Las partículas de refuerzo en concreto generan esfuerzos de tensión cuando es sometido a una fuerza aplicada, lo que da lugar a un rápido agrietamiento y falla inmediata. No obstante, estudios reportados en la literatura señalan que las partículas de llanta pueden mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Las partículas obtenidas de llantas provienen de procesos de rallado, picado y molido. Se deben tener en cuenta las propiedades de las partículas de llanta, así como las de los componentes del concreto. Las propiedades mecánicas del concreto con partículas de llanta dependen de: a) la concentración de partículas, y b) del tamaño de partícula.

Cuando se incrementa la concentración de partículas de llanta disminuye la resistencia a la compresión y a la tensión, así como la rigidez. La pérdida de resistencia puede ser hasta del 80% ya que las partículas de llanta no sólo actúan como concentradores de esfuerzo, sino que también son responsables de generar esfuerzos de tensión dentro de la matriz del concreto, que dan lugar a un rápido agrietamiento y falla inmediata (El-Dieb, Abdel-Wahab & Abdel-Hameed, 2001; Eldin & Senouci, 1993). Por otro lado, las partículas de llanta tienen un efecto limitado sobre la propagación de grietas, que conduce a un aumento significativo de la resistencia a tensión, ductilidad y capacidad de absorción de energía (Taha et al., 2008; El-Dieb et al., 2001).

Otra ventaja de las partículas de llanta es la absorción de sonido; más aún se está trabajando en la capacidad de absorción de energía de las partículas en beneficio de la elasticidad del concreto. Sin embargo, debido a las diferencias del módulo de Young tanto de las partículas como de la matriz de concreto, se tendrían que someter los concretos a grandes deformaciones, lo que causaría disminución progresiva en las propiedades mecánicas.

Por otro lado, existen estudios que indican que un factor importante en la disminución de la resistencia es el tamaño de partícula, en algunos se dice que al agregar partículas más grandes, se presentan resistencias más bajas, en comparación a concretos elaborados con partículas más finas de reciclado de llanta (Khatib & Bayomy, 1999; Topcu, 1995). Sin embargo, otros estudios afirman lo contrario, es decir, que partículas más finas en la mezcla de concreto, propician una menor resistencia mecánica (Ali, Amos & Roberts, 1993; Fattuhi & Clark, 1996).

Un factor preponderante en las propiedades mecánicas es la rugosidad que presentan las partículas en su superficie, de esta depende la adherencia del cemento en el concreto. Partículas de llanta fueron lavadas con agua para librarlas de contaminantes, después fueron sumergidas en ácidos y agentes Naikcon al fin de incrementar la textura superficial, posteriormente fueron añadidas a la mezcla de concreto; los resultados muestran ligera disminución de la resistencia mecánica, respecto a los concretos normales (Eldin & Senouci, 1993; Rostami, Lepore, Silverstraim & Zundi, 2000).

En un estudio realizado por los autores sobre concreto reforzado con partículas de llantas recicladas; se sustituyó parte del agregado fino (arena) por partículas de llanta, las cuales fueron añadidas en diferentes concentraciones (10%, 20% y 30%) y tamaños (2.8 mm y 0.85 mm). Los resultados muestran que a ciertos tamaños y a determinadas concentraciones de partícula, existe una ligera disminución de la resistencia a la compresión, pero un aumento en la resistencia a tensión y en la absorción de sonido; esto confiere al concreto características deseables para usos en la industria de la construcción, como pisos industriales o bases para maquinarias sujetas a vibración constante (Herrera-Sosa, 2014). A continuación se presentan los resultados.

Materiales reciclados de llantas automotrices y la radiación gamma en el mejoramiento del concreto

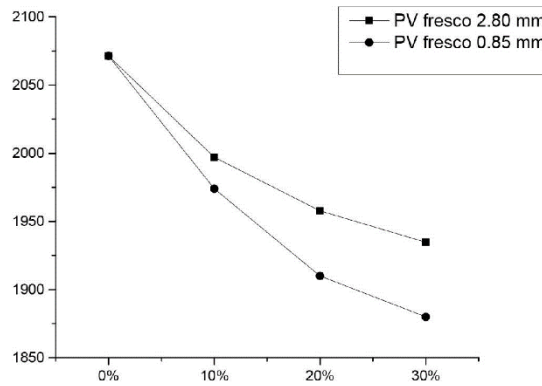


Figura 3. Peso volumétrico de concretos con partículas de llanta reciclada (kg/m³)

En la Figura 3, se muestran los resultados de peso volumétrico de los concretos. Se puede observar que a medida que aumenta el porcentaje de llanta reciclada (en sustitución de la arena), el peso volumétrico del concreto disminuye, lo cual se debe a que las partículas ocupan un mayor volumen por unidad de peso. Además, los concretos elaborados con un tamaño mayor de partícula tienen mayores pesos volumétricos que los elaborados con menor tamaño.

La resistencia a compresión, que es uno de los parámetros más importantes a medir en el concreto, disminuye al aumentar el porcentaje de llanta; y es menor para concretos con menor tamaño de partícula, como se aprecia en la Figura 4.

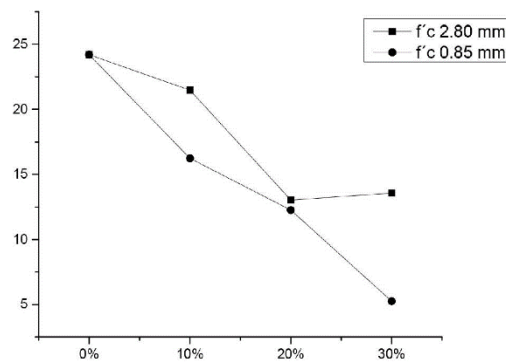


Figura 4. Resistencia a la compresión de concretos con partículas de llanta reciclada (MPa)

E.S. Herrera-Sosa, G. Martínez-Barrera, C. Barrera-Díaz, E. Cruz-Zaragoza

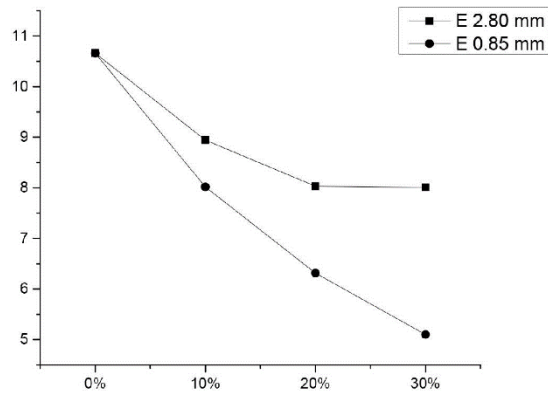


Figura 5. Módulo de elasticidad de concretos con partículas de llanta reciclada (Gpa)

La disminución de la resistencia se debe a la diferencia entre el módulo de Young entre los dos materiales (concreto y partículas de llanta) lo que genera concentradores de esfuerzos y propicia la pronta falla; esto se puede apreciar también en la disminución del módulo elástico del concreto a medida que aumenta el porcentaje de reciclado de llanta (Figura 5).

Los resultados de las pruebas a flexión muestran valores casi constantes hasta concentraciones del 20% de partículas de llanta reciclada, pero disminución de los mismos para un contenido del 30% (Figura 6).

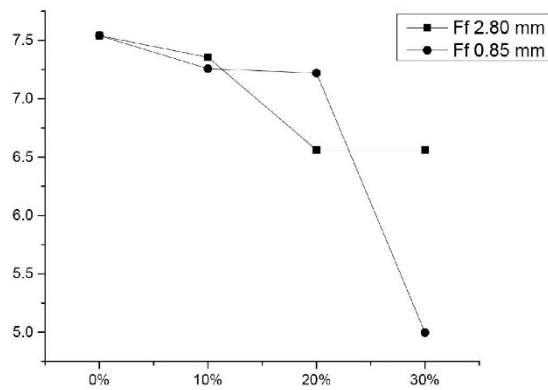


Figura 6. Resistencia a la flexión de concretos con partículas de llanta reciclada (MPa)

Materiales reciclados de llantas automotrices y la radiación gamma en el mejoramiento del concreto

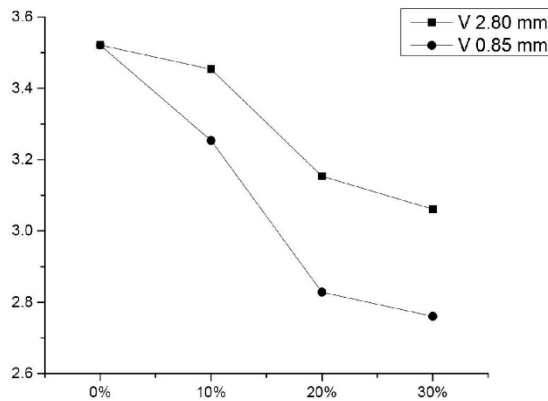


Figura 7. Velocidad de Pulso de concretos con partículas de llanta reciclada (Km/s)

Las pruebas de velocidad de pulso siguen la misma tendencia: los valores disminuyen al aumentar la cantidad de reciclado de llanta (Figura 7). Esto indica que a medida que aumenta la concentración de partículas de llanta, estas absorben más la energía de las ondas sonoras, lo que se traduciría en absorción de energía como vibraciones.

5. Radiación Gamma

La radiación gamma (γ) es un tipo de radiación electromagnética de alta energía formada por fotones y producida generalmente por elementos radioactivos o procesos subatómicos como la aniquilación de un par positrón-electrón. Este tipo de radiación ionizante de tal magnitud, es capaz de penetrar en la materia más profundamente que la radiación alfa o beta (Reichmanis, O'Donell & Hill, 1993).

Cuando se somete un material polimérico a radiación ionizante, se producen efectos físicos y químicos que están en función de la naturaleza de los polímeros, así como de la dosis de la radiación. La ventaja de trabajar con este tipo de macromoléculas, es la gran sensibilidad a cambios en los enlaces químicos, obteniéndose propiedades diferentes en cuanto a cristalinidad, densidad, coeficiente de expansión térmica, módulo de elasticidad, permeabilidad, así como en la resistencia a la corrosión, a la abrasión y a disolventes.

La fuerza total de atracción entre las moléculas de un polímero depende del número de las interacciones. Como máximo, sería igual a la energía de enlace multiplicada por el número de átomos de carbono (C) en el caso del polietileno o por el número de carbonilos (C = O) en los poliésteres, etc. Rara vez se alcanza este valor máximo ya que las cadenas, por lo general, no pueden acomodarse con la perfección requerida.

Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases: a) Fuerzas de Van der Waals, son de dispersión y están asociadas a

E.S. Herrera-Sosa, G. Martínez-Barrera, C. Barrera-Díaz, E. Cruz-Zaragoza

las moléculas de muy baja polaridad; en general se forman dipolos no permanentes, que producen atracciones electrostáticas muy débiles en las moléculas de tamaño normal, pero en los polímeros las fuerzas de atracción se multiplican y llegan a ser enormes (2,4 Kcal/mol); b) fuerzas de Atracción dipolo-dipolo, son más energéticas, a ellas se debe la gran resistencia en tensión de las fibras de los poliésteres (3 a 5 Kcal/mol); c) enlaces de Hidrógeno, estas interacciones son tan fuertes, que fibras de poliamidas (nylon) tiene resistencia a la tensión mayor que la de una fibra de acero de igual masa (5 a 12 Kcal/mol); d) Ionómeros, son atracciones de tipo iónico, son las más intensas (>100 Kcal/mol).

La variación en la composición química y en la estructura molecular de los polímeros es el resultado de la presencia de grupos finales, ramas, variaciones en la orientación de unidades monoméricas y la irregularidad en el orden en el que se suceden los diferentes tipos de esas unidades.

Con la radiación gamma es posible modificar la estructura química de las partículas o fibras poliméricas a través de tres procesos: escisión o rompimiento de cadenas (*scission*), entrecruzamiento (*cross-linking*) e injerto (*grafting*). Estos mecanismos contribuyen, en mayor o menor medida, a modificar el comportamiento mecánico de los polímeros. La influencia de cada proceso depende de la cantidad de energía absorbida por unidad de masa (dosis), de la concentración, de la dispersión, de la atmósfera (inerte o aire) y la temperatura a la cual se realiza la irradiación, así como del post-tratamiento (Martínez, Benavides & Carrasco, 2010).

Los efectos de la irradiación gamma en polímeros suelen evaluarse a través de los cambios en la estructura química (con el análisis de la distribución de pesos moleculares) y en el comportamiento mecánico. Estos cambios que son debidos a la formación de enlaces, rotura de cadenas, desprendimiento de radicales que integran las unidades monoméricas y la oxidación entre otros, permiten incrementar el grado de polimerización o el reticulado de la estructura ya que generan una reordenación geométrica de la estructura del polímero (Povolo, Hermida & Gómez, 2000).

La radiación gamma modifica la estructura polimérica a través de la formación de una variedad de grupos funcionales como carbonilos, carboxilos, ésteres e hidroxilos, induciendo frecuente y simultáneamente, tanto la ruptura de las cadenas hidrocarbonadas como su entrecruzamiento, lo que se traduce en cambios en la resistencia mecánica, transparencia, capacidad aislante y repelencia al agua, por ejemplo. Un efecto importante promovido por la radiación, es la variación en la masa molecular, la cual proporciona información sobre la fase cristalina del polímero (Buttafava, Consolati, Mariani, Quasso & Ravasio, 2005).

Los elastómeros son muy susceptibles a la acción de la radiación, la mayoría de ellos se entrecruzan. En términos generales, los elastómeros pueden sufrir grandes deformaciones sin ruptura, y volver a su estado original cuando se suprime la fuerza aplicada. Este comportamiento elástico es una consecuencia del estado desordenado de las cadenas poliméricas. El entrecruzamiento en los elastómeros no es tan denso como en los polímeros termoestables y presentan una elevada movilidad de cadenas por encima de su temperatura vítrea (T_g). A bajas temperaturas el comportamiento elástico no se produce y en vez de tener un material tenaz, flexible y altamente deformable, se tiene un material rígido, quebradizo y fácil de fracturar (estado vítreo).

Los elastómeros disminuyen los valores en sus propiedades elásticas a dosis del orden de 10,000 kGy. Este efecto es más pronunciado si la radiación de lleva a cabo en presencia de oxígeno, dado

Materiales reciclados de llantas automotrices y la radiación gamma en el mejoramiento del concreto

que la mayoría de los elastómeros son muy sensitivos al "envejecimiento oxidativo". Los agentes protectores más eficientes son los antioxidantes, los cuales previenen la degradación oxidativa a través de su interacción con los radicales libres producto de las reacciones del polímero ante la radiación, no permitiendo que estos se oxiden al reaccionar con el oxígeno (Chapiro, 1962).

La vulcanización del caucho mediante radiación en forma húmeda presenta algunos beneficios en comparación con vulcanización química convencional (Makuuchi, Yoshi, Ishigaki, Tsushima, Mogi & Saito, 1990); el proceso es más controlado, preciso, rápido, versátil, consume menos energía; el curado es a temperatura ambiente, se puede controlar y presenta una reticulación uniforme y no genera residuos. Este proceso en forma seca, tiene la ventaja de tener mayor estabilidad, menor degradación y mejores propiedades mecánicas (Chaudhari, Bhardwaj, Patil, Dubey, Kumar & Sabharwal, 2005).

La vulcanización de caucho natural por medio de la radiación ha sido estudiada en su forma pura, así como en presencia de aditivos (Haque, Dafader, Akhtar & Ahmad, 1996; Jayasuriya, Makuuchi & Yoshi, 2001; Sabharwal, Das, Chaudhari, Bhardwaj & Majali, 1998), que han permitido una mejor comprensión de los efectos durante la irradiación y los efectos del secado de las partículas curadas post-irradiación (Qiao, Wei, Zhang, Zhang, Gao, Zhang et al., 2002).

Se han reportado los efectos de la radiación en cauchos sintéticos de polibutadieno, ampliamente utilizado en diversas aplicaciones (Perera, Albano, Gonzalez, Silva & Ichazo, 2004). Así como en el polibutadieno y sus mezclas (Marcilla, Garcia-Quesada, Hernandez, Ruiz-Femenia & Perez, 2005; Peng, Wang, Qiao & Wei, 2005).

Algunos de los efectos que se han podido observar, en cuanto a las propiedades mecánicas del elastómero, son la disminución de la resistencia a la tracción y de la deformación, pero aumento del módulo elástico, con el aumento de la dosis. Después del proceso de radiación, las partículas del elastómero se funden juntas en una película transparente debido a un proceso de evaporación del medio de emulsión; la interacción entre las partículas determina la resistencia a la tracción y el aumento de la resistencia a la rotura de la película esto es debido al aumento de la densidad de la retícula al aumentar la dosis (Liu, Huang, Hou Deyu & Zhang, 2007).

En estudios de mezclas de estireno y butadieno irradiados con una fuente de ⁶⁰cobalto se observa que la dureza de las muestras aumentaba con la dosis. La densidad de reticulación del polímero aumenta ligeramente, pero la del aromático disminuye ligeramente (Traeger & Castonguay, 1966). En otro estudio se reporta la obtención de polibutadieno mediante la polimerización inducida por radiación gamma de butadieno en etanol, a temperatura entre 15 y 45°C; se observa que la velocidad de polimerización aumenta al agregar peróxido de hidrógeno como iniciador (Zhang, Zhang & Ying, 1991).

6. Uso de la Radiación Gamma en el Mejoramiento del Concreto

En el concreto, una alternativa que ha probado ser eficiente para aumentar los valores de resistencia, es el uso de la radiación gamma a través de dos métodos:

- Modificación de las propiedades estructurales de los refuerzos y su posterior incorporación a las mezclas de concreto.
- Irradiación directa del concreto con los refuerzos incluidos.

E.S. Herrera-Sosa, G. Martínez-Barrera, C. Barrera-Díaz, E. Cruz-Zaragoza

Después de la irradiación, los cambios estructurales de los refuerzos se relacionan con las propiedades mecánicas del concreto, incluidas la resistencia a tensión, a la compresión, al impacto, así como las deformaciones en el punto de cedencia y a la ruptura.

Son pocas las investigaciones encaminadas a evaluar el efecto de la radiación gamma en concretos. En uno de los trabajos se llevó a cabo la modificación estructural de fibras de nylon 6 mediante la aplicación de radiación gamma a dosis de 5, 10, 50, y 100 kGy; las cuales posteriormente fueron incorporadas en las mezclas de concreto. Los resultados muestran que los valores más altos de resistencia a la compresión se lograron con fibras irradiadas a 50 kGy y añadidas al 2% en volumen en el concreto; el mayor valor fue de 122.2 MPa, mientras que el concreto sin fibras irradiadas tuvo un valor de 35 Mpa (Martínez-Barrera, Viguera-Santiago, Hernández-López, Menchaca-Campos & Brostow, 2005; Martínez-Barrera, 2009).

Los cambios en los refuerzos pueden ser controlados mediante una dosis apropiada de radiación, por ejemplo se puede lograr una superficie rugosa y agrietada que permita obtener una mayor compatibilidad con la matriz cementante (Martínez-Barrera, 2009). En otro estudio, se analizó el efecto de la radiación gamma en las propiedades mecánicas del concreto utilizado en estructuras para seguridad nuclear. El concreto se expuso a una dosis de 500 kGy de radiación gamma, obteniéndose disminución la porosidad y en las propiedades mecánicas del concreto; atribuida a la formación de calcita (CaCO_3) en un medio de CO_2 (Voda'k, Trtik, Sopko, & Kapickova, 2005).

En un estudio realizado sobre concreto reforzado con partículas de llanta reciclada irradiada y sin irradiar, se obtuvieron diversos resultados de las propiedades de: Resistencia a la compresión ($f'c$), módulo de elasticidad (E), resistencia a la tensión (T), velocidad de pulso ultrasónico (Vp), Resistencia a la flexión (fr) y peso volumétrico (PV) (Herrera-Sosa, 2014).

En las Figuras 8 y 9, se muestran los resultados de concretos irradiados a 200 y 250 KGy, elaborados con partículas de llanta de 0.85 mm y 2.8 mm, en sustitución de la arena a razón de 10, 20 y 30% en peso. También se muestran los concretos con partículas sin irradiar y con los mismos porcentajes de sustitución, con el fin de comparar resultados.

Los concretos con partículas de 0.85 mm presentan mayor disminución en las propiedades mecánicas, que los concretos con partículas de 2.8 mm. No obstante, el peso volumétrico aumenta cuando se incrementa la dosis de radiación. En general, este incremento se debe a que las partículas irradiadas se vuelven más compactas y rígidas.

En la Figura 9, se puede observar aumento de la resistencia a compresión para los concretos elaborados con partículas de llanta de 2.8 mm e irradiados a 250 KGy, que no solo son mayores a sus equivalentes sin irradiar y los irradiados a 200 KGy, sino que incluso, los elaborados con el 10% de este material, son mayores a los resultados obtenidos con los concretos testigo. A 250 kGy se mejora la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad con respecto a los concretos elaborados con partículas de llanta irradiados a menor dosis, pero estos no exceden el valor de los concretos testigos.

Estos resultados abren la posibilidad de investigaciones con grandes beneficios, por un lado el reúso de llantas recicladas en concretos y por otro el mejoramiento de las propiedades del mismo. Se desea asegurar el beneficio económico en el contexto del desarrollo sostenible, que implica resolver el problema de la contaminación ambiental provocada por las llantas de desecho, para lograr el bienestar de la población mejorando su calidad de vida.

Materiales reciclados de llantas automotrices y la radiación gamma en el mejoramiento del concreto

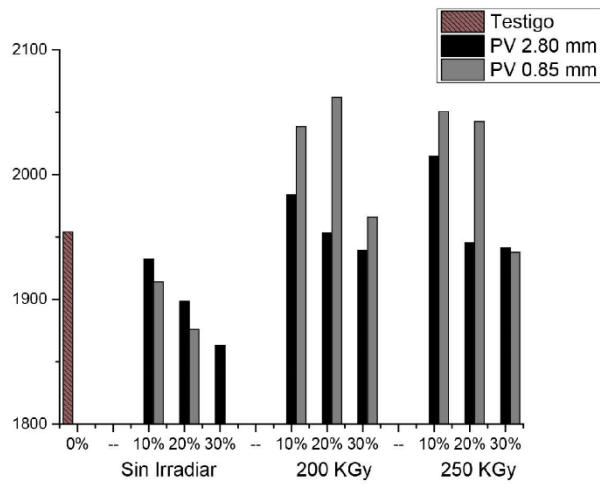


Figura 8. Peso volumétrico de concretos irradiados con partículas de llanta reciclada(kg/m³)

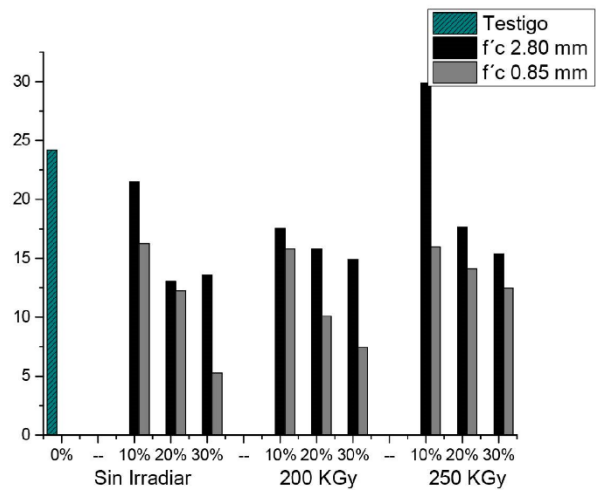


Figura 9. Resistencia a la compresión de concretos irradiados con partículas de llanta reciclada (Mpa)

E.S. Herrera-Sosa, G. Martínez-Barrera, C. Barrera-Díaz, E. Cruz-Zaragoza

7. Conclusiones

Grandes esfuerzos se han hecho en materia ambiental para disminuir la contaminación, como la presente investigación, que contempla el uso de llantas de desecho como material de refuerzo del concreto. En general se observa disminución en las propiedades mecánicas de los concretos cuando se añade el reciclado de llanta, algo no deseado para un concreto; sin embargo, el tratamiento a base de rayos Gamma permite mejorar las propiedades dentro de la mezcla, con resultados superiores a los concretos testigos. Esto representa una solución a los inconvenientes de utilizar estos materiales dentro de la industria de la construcción. Finalmente, la combinación del bajo costo del material de desecho y del aumento en las propiedades mecánicas del concreto, hacen de este un producto atractivo con beneficios no solo económicos, sino ambientales.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT), por la beca otorgada a E.S. Herrera-Sosa para la realización de sus estudios de Doctorado en Ciencias Ambientales en la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM); lo que permitió su colaboración en esta investigación.

Referencias

- Ali, N.A., Amos, A.D., & Roberts, M., (1993). Use of ground rubber tires in Portland cement concrete. En: Dhir, R.K. (Ed.). *Proceedings of the International Conference on Concrete 2000*, University of Dundee, Scotland, UK. 379-390.
- Amirkhonian, S.N. (2001). *Utilization of Crumb Rubber in Asphaltic Concrete Mixtures - South Carolina's Experience*. Research report. South Carolina Department of Transportation.
- Briodsky, H. (2001). *The Important Role Retreads Can Play in Reducing the Scrap Tyre Problem. Recycling and Use of Used Tyres*. London: Thomas Telford.
- Brown, K.M., Cumming, R., Morzek, J.R., & Terrebbono, P., (2001). Scrap Tire Disposal: Three Principles for Policy of Choice. *Natural Resources Journal*, 41 (1), 9-22.
- Buttafava, A., Consolati, G., Mariani, M., Quasso, F., & Ravasio, U. (2005). Effects induced by gamma irradiation of different polyesters studied by viscometry, thermal analysis and positron annihilation spectroscopy. *Polymer Degradation and Stability*, 89, 133-139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.01.009>
- Chapiro, A. (1962). *Radiation chemistry of polymeric systems*. London: Interscience.
- Chaudhari, C.V., Bhardwaj, Y.K., Patil, N.D., Dubey, K.A., Kumar, V., & Sabharwal, S., (2005). Radiation-induced vulcanization of natural rubber latex in presence of styrene-butadiene rubber latex. *Radiat. Phys. Chem.*, 72, 613-618.

Materiales reciclados de llantas automotrices y la radiación gamma en el mejoramiento del concreto

- Davies, R.W., & Worthinton, G.S. (2001). Use of scrap Tyre as a Fuel in the Cement Manufacturing Process. En Dhir R.K. (Ed.). *Recycling and Use of Tyres*. London: Thomas Telford.
- Dhir, R.K., Limbachiya, M.C., & Paine K.A. (Ed.) (2001). *Recycling and Use of Tyres*. London: Thomas Telford.
- El-Dieb, A.S., Abdel-Wahab, M.M., & Abdel-Hameed, M.E. (2001). Concrete Using Tire Rubber Particles as Aggregate. En Dhir R.K. (Ed.). *Recycling and Use of Tyres*, London: Thomas Telford.
- Eldin, N.N., Senouci, A.B. (1993). Tire Rubber Particles as Concrete Aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5(4), 478-498.
- Fattuhi, N.I., & Clark, N.A. (1996). Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. *Journal of Construction and Building Materials* 10(4), 229-236.
[http://dx.doi.org/10.1016/0950-0618\(96\)00004-9](http://dx.doi.org/10.1016/0950-0618(96)00004-9)
- Greenpeace International. Las tres R del Reciclaje. <http://www.greenpeace.org/international>. (Consultado: Marzo 2011).
- Haque, M.E., Dafader, N.C., Akhtar, F., & Ahmad, M.U., (1996). Radiation dose required for the vulcanization of natural rubber latex. *Radiat. Phys. Chem.*, 48(4), 505-510.
- Herrera-Sosa, E.S. (2014). Waste tire particles and gamma radiation as modifiers of the mechanical properties of concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 327856, 7 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/327856>
- Instituto de Investigaciones en Materiales-UNAM. <http://www.iim.unam.mx/> (consultado mayo 2012).
- Jayasuriya, M.M., Makuuchi, K., & Yoshi, F. (2001). Radiation vulcanization of natural rubber latex using TMPTMA or PEA. *Euro. Polym. J.*, 37, 93-98.
- Khatib, Z.K., & Bayomy, F.M. (1999). Rubberized portland cement concrete. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering* 11 (3), 206-213.
- Liu, Y., Huang, Y., Hou, J., Deyu, G., & Zhang, X. (2007). Vulcanization of polybutadiene latex induced by 60Co γ radiation. *Journal of Radiation Research and Radiation Process*, 25, 350-354.
- Makuuchi, K., Yoshi, F., Ishigaki, I., Tsushima, K., Mogi, M., & Saito, T. (1990). Development of rubber gloves by radiation vulcanization. *Radiat. Phys. Chem.*, 35, 154-157.
- Malhotra, V.M. (2000). *Role of Supplementary Cementing Materials in Reducing Greenhouse Gas Emissions. Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century*. London. 226-235.
- Marcilla, A., Garcia-Quesada, J.C., Hernandez, J., Ruiz-Femenia, R., & Perez, J.M. (2005). Study of polyethylene crosslinking with polybutadiene as coagent. *Polym. Test.*, 24(7), 925-931.
- Martínez-Barrera, G., Giraldo, L.F., López, B.L., & Brostow, W. (2008). Effect of gamma radiation on fiber-reinforced polymer concrete. *Polym. Compos.*, 29, 1245-1251.
<http://dx.doi.org/10.3144/expresspolymlett.2009.77>
- Martínez-Barrera, G. (2009). *Uso de fibras poliméricas en el mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto. Tópicos en Materiales*. México: UAEM. 125-169.

E.S. Herrera-Sosa, G. Martínez-Barrera, C. Barrera-Díaz, E. Cruz-Zaragoza

- Martínez-Barrera, G., & Brostow, W. (2009). *Fiber-reinforced polymer concrete: Property improvement by gamma irradiation. Gamma radiation effects on polymeric materials and its applications*. Kerala India: Research Signpost. 27-44. ISBN 978-81-308-0293-0.
- Martínez-Barrera, G., Viguera-Santiago, E. Hernández-López, S., Menchaca-Campos, C., & Brostow W. (2005). Mechanical improvement of concrete by irradiated polypropylene fibers. *Polym. Eng. Sci.*, 21, 1426-1431. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.20418>
- Martínez, M.E., Benavides, C., & Carrasco, H. (2010). Efecto de la radiación ionizante en polímeros. *Contribuciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la Ciencia y la Tecnología en México*. Edición conmemorativa Cap. 27.
- Navarro, F.J., Partal, P., Martínez-Boza, F., & Gallegos, C. (2005). Influence of Crumb Rubber Concentration on the Rheological Behavior of Crumb Rubber Modified Bitumen. *Energy and Fuels*, 19, 1984-1990. <http://dx.doi.org/10.1021/ef049699a>
- Nelson R.G., & Hossain, A.S.M.M. (2001). *An Energetic and Economic Analysis of Using Scrap Tyres for Electricity Generation and Cement Manufacturing. Recycling and Use of Tyres*. London: Thomas Telford.
- Neville, A.M., & Brooks, J.J. (Eds.) (1998). *Tecnología del Concreto*. México: Trillas.
- Peng, J., Wang, M., Qiao, J., & Wei, G. (2005). Radiation-induced grafting polymerization of MMA onto polybutadiene rubber latex. *Radiat. Phys.Chem.*, 72, 739-743.
- Perera, R., Albano, C., Gonzalez, J., Silva, P., & Ichazo, M., (2004). Effect of gamma radiation on the properties of polypropylene blends with styrene-butadiene-styrene copolymers. *Polym. Degrad. Stab.*, 85, 741-750.
- Povolo, F., Hermida, E.B., & Gómez, A. (2000). Tracción de películas de polipropileno-etileno (PEP) irradiado en un reactor experimental. *Trabajo presentado en las Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga* (pp. 995-1000). Argentina.
- Qiao, J., Wei, G., Zhang, X., Zhang, S., Gao, J., Zhang, W. et al. (2002). US Patent 6, 423, 760, July 23.
- Reichmanis, E.F., O'Donnell, H.J., & Hill, T.J.D. (1993). Radiation Effects on Polymeric Materials: A brief overview. *Irradiation of Polymeric Materials*. ACS Symposium Series.
- Rostami, H., Lepore, J., Silverstraim, T., & Zundi, I., (2000). Use of recycled rubber tires in concrete. En: Dhir, R.K. (Ed.). *Proceedings of the International Conference on Concrete 2000*, University of Dundee, Scotland, UK. 391-399.
- Sabharwal, S., Das, T.N., Chaudhari, C.V., Bhardwaj, Y.K., & Majali, A.B. (1998). Mechanism of n-BA sensitization action in radiation vulcanization of natural rubber latex. *Radiat. Phys. Chem.*, 51(3), 309-315.
- Taha, M.R., El-Dieb, A.S., & Nehdi, M. (2008). *Recycling Tire Rubber in Cement-Based Material*. Concrete with Recycled Materials, ACI Committee 555.
- Topcu, I.B. (1995). The properties of rubberized concrete. *Cement and Concrete Research*, 25(2), 304-310.
- Traeger R.K., & Castonguay, T.T. (1966). Effect of γ -radiation on the dynamic mechanical properties of styrene-butadiene rubbers. *Journal of Applied Polymer Science*, 10(3), 491-509.

Materiales reciclados de llantas automotrices y la radiación gamma en el mejoramiento del concreto

US Environmental Protection Agency. (1997). *Emisiones al Aire de la Combustión de Llantas Usadas*, EPA-600/R-97-115, U.S.-México Centro de Información sobre Contaminación del Aire / CICA. Fecha último acceso: Julio 2013. http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/tire_esp.pdf

Voda'k, F., Trtík, K.V., Sopko, O., & Kapickova, P. (2005). Effect of γ -irradiation on strength of concrete for nuclear-safety structures. *Cement and Concrete Research*, 35, 1447-1451. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.016>

Yang, J., Kaliaguine, S., & Roy, C. (1993). Improved quantitative determination of elastomers in tire rubber by kinetic simulation of DTG curves. *Rubber Chemistry and Technology*, 66, 213-229.

Zhang, J., Zhang, Z., & Ying, S. (1991). Study of gamma-ray radiation-induced polymerization of butadiene in ethanol. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry*, 37(2), 263-266. [http://dx.doi.org/10.1016/1359-0197\(91\)90139-S](http://dx.doi.org/10.1016/1359-0197(91)90139-S)

6.3. ARTÍCULO 2 (ENVIADO)

- 234690: Acknowledging Receipt

- **International Journal of Polymer Science**

mayo5 a las 5:53 P.M. ★

Para gonzomartinez02@yahoo.com.mx

CC noha.elmoemen@hindawi.com, sadoths@yahoo.com.mx, cbd0044@yahoo.com, ecruz@nucleares.unam.mx, fernando.urena@inin.gob.mx

Dear Dr. Martínez-Barrera,

The Research Article titled "Recovery and modification of waste tire particles and their use as reinforcements of concrete," by Eduardo Sadot Herrera-Sosa, Gonzalo Martínez-Barrera, Carlos Eduardo Barrera-Díaz, Epifanio Cruz-Zaragoza and Fernando Ureña-Nuñez has been received and assigned the number 234690.

The special issue for which the paper is being processed is
"Civil Engineering Applications of Polymer Composites"

All authors will receive a copy of all the correspondences regarding this manuscript.

Thank you for submitting your work to International Journal of Polymer Science.

Best regards,

Noha Elmoemen
Editorial Office
Hindawi Publishing Corporation
<http://www.hindawi.com>

Recovery and modification of waste tire particles and their use as reinforcements of concrete

Eduardo Sadot Herrera-Sosa^a, Gonzalo Martínez-Barrera^{b*}, Carlos Barrera-Díaz^c, Epifanio Cruz-Zaragoza^d

^a Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Paseo Colón esq. Paseo Tollocan S/N; Toluca 50180, México; sadoths@yahoo.com.mx

^b Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Km.12 de la carretera Toluca-Atlacomulco, San Cayetano 50200, México; gonzomartinez02@yahoo.com.mx

^c Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable, Universidad Autónoma del Estado de México – Universidad Nacional Autónoma de México (UAEM-UNAM), Carretera Toluca-Atlacomulco, km 14.5, Unidad El Rosedal, C.P. 50200, Toluca, Edo. de México, México; cbd0044@yahoo.com

^d Unidad de Irradiación y Seguridad Radiológica, Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, A.P. 70-543, 04510, D.F. México; ecruz@nucleares.unam.mx

* **Corresponding author after publication**

Abstract

Environmental pollution caused by solid wastes are increasing in the last decades, one of this is referred to automotive tires, which are recycled by different methods; including mechanical grinding. One of the most recurrent applications is to use recycled particles as fillers in building materials, as hydraulic concrete. Nevertheless, detrimental values on the mechanical properties are obtained when they are added. For solving these problems, in this work a novel proposal is to modify the physicochemical properties of the waste automotive tire particles, previously obtained by grinding process, by using gamma irradiation in order to use them as reinforcements of hydraulic concrete. The results show improvement in compressive and tensile strength for concrete elaborated with irradiated tire particles.

Introduction

One of the major environmental problems around the world is the final disposal of waste of automotive tires. Recycling of such materials has been carried out by different process, including: a) landfilling which is the most common; b) for to produce carbon black by pyrolysis process, which sometimes is not economically viable due to low quality final products; c) used as fuel in cement kilns, whose cost is lower than raw tire materials, which is an example of down cycling process; d) recycling by shredding process, followed by an electromagnetic separation allow to obtained rubber particles and steel fibers, to reuse them in several applications (Siddique and Naik, 2004; Neocleous et al., 2006).

Recycled waste tires have been used in the construction industry, some examples of their uses are: a) waste steel fibers from recycled tire as mechanical reinforcement of concrete, wit which was possible to improve the mechanical performances of the concrete (Neocleous et al., 2006; Tlemat et al., 2004a,b; Aiello et al., 2009); b) recovered rubber as replacement of natural aggregates (fine and coarse), with which the elasticity features were improved and lower diminution on the compressive strength and brittleness values were found; moreover, with rubber particles reduction on the water absorption was possible, thus better protection of the steel reinforcement against corrosion, as well as reduction of the structural weight (Topcu, 1995; Topcu and Avcular, 1997; Mohammed et al., 2012; Pelisser et al., 2011; Bravo and de Brito, 2012; Benazzouk et al. (2007); c) by addition of rubber tire in concrete the fracture properties are enhanced, but flexural strength is diminishes (Al-Tayeb et al. 2012a; Ho et al. 2012); d) recycling tires as foundation pad for rotating machinery, as vibrations damper in the railway station or where impact resistance, energy absorption or blast are required (Fattuhi and Clark, 1996).

Apart of advantages recycled materials should show these their disadvantages, in terms of lower values obtained; such kind of problems can be attended, one alternative is use gamma radiation. Recent works have studied the effects of gamma radiation on compressive properties of polymer concrete; in one of them, the results show more resistance to crack propagation as well as the compressive strain and the elasticity modulus depend on the combination of the particle sizes and the radiation dose.

The Gamma radiation (γ) is a type of high electromagnetic energy radiation, generally produced by radioactive elements or subatomic processes such as the annihilation of a positron-electron pair. One important characteristic is its capacity to penetrate in matter deeper than alpha or beta radiation (Reichmanis, 1993). In general, the gamma rays strike and pass through the material, it depends on the photon energies, thickness or density of the materials.

Application of gamma radiation in polymeric materials causes three different processes: cross-linking or scission of polymer chains, and graft polymerization. The permanence of any of these processes depends on the nature of the radiation, the chemical structure of the polymer and the applied dose (Cruz-Zaragoza, 2009). In general, molecular weight changes are produced after chemical reactions; affecting the physical properties. For example, vulcanization of chlorine butyl rubbers by using gamma radiation, covering dosages from 25 kGy to 200 kGy. Results show diminution on the tensile strength and elongation at break up to 25 kGy, but after this dose stability of such properties are observed, up to 200 kGy. By following a combine process, irradiation and shear stress, high content of gels with low molecular weight are obtained. Moreover, thermal stability is reduced through the degradation and scission of molecular chains (Scagliusi et al., 2012).

In other study, Polydimethylsiloxane rubber foams were gamma irradiated and their mechanical properties and chemical structure were evaluated, through compression test, infrared attenuated total reflectance spectroscopy (ATR) and X-ray induced photoelectron spectroscopy (XPS). Results show higher cross-linking of polymer chains when increasing the irradiation dose, thus foams became harder (Sui et al. 2013).

The high-energy radiation is not frequent in the preparation of composites; nevertheless it has special advantages in the control polymerization because it can be initiated uniformly within small thicknesses of material. This process, compared to thermal process or chemical attack, presents several advantages, for example: initiating radiation requires no activation energy, does not require catalysts or additives to initiate the reaction, the initiation is homogeneous throughout the system the process can be carried out at any temperature and can be interrupted at a specific reaction time, the termination reaction is practically

controlled, the polymer can be analyzed to a specific reaction step, and during temperature initialization reaction is maintained, unlike the one presented in a conventional exothermic curing without irradiation and above all it is faster spending less time and money (Cruz-Zaragoza, 2009; Dobo et. al, 1985; Clough et al., 2001; Barbuta, 2008).

Some studies are covered the effects of gamma radiation on composite materials, for example on the mechanical properties and durability of cement concretes. Some applications include concrete as material for nuclear power reactors; for this purpose the specimens were submitted to dosages from 227 MGy and 470 MGy with a dose rate of 5.0 kGy/h. The results show diminution of about 10% on the elastic and tensile properties, as well as loss of weight, caused by one or more of the following mechanisms: a) "natural" drying (including gamma heating); b) radiolysis-induced accelerated drying (where large gas is released); c) radiolysis-induced carbonation, and d) degradation of the calcium-bearing cement hydrates. (Le Pape et al., 2014; Kelly et al., 1969).

Some studies are covered the effects of gamma radiation on composite materials, for example on the compressive properties of polymer concretes, where the results show the compressive strain and the elasticity modulus depend on the particle sizes used and the applied radiation dose, in particular more resistance to crack propagation is obtained. Other studies were using recycled polymers and gamma radiation, for example: a) Polymer concrete with recycled high density polyethylene (HDPE) and tire rubber particles, irradiated from 25 to 50 kGy. The results show significant increase on the impact strength and in the elongation at break; such improvements were attributed to the good adhesion between tire rubber particles and the polymer matrix (Sonnier, 2006); Polymer concrete with styrene butadiene rubber (SBR) and waste tire rubber where tensile strength, elongation and heat resistance were improved up to 75 kGy (Tariq et al, 2015).

This study attempts to use gamma irradiation as modifier of the physicochemical properties of waste automotive tire particles, and use them as reinforcement of cement concrete and in consequence improve their mechanical properties. This investigation promotes the use of waste materials in the construction industry, as one alternative for reducing environmental pollution.

Experimental

Design and manufacture of concrete

All mixes were elaborate with Portland cement CPC-30R (according to ASTM C 150 cement type I), sand, gravel and water. The objective was to obtain a mix with 24.5 MPa in compression strength at 28 days of curing, according to ACI 211.1 standard. Physical properties of the concrete components and the sieve analyses of fine and coarse aggregates are described in reference (Herrera-Sosa, 2014).

Mixing, Casting and Curing Specimens

Plain concrete mixtures were prepared with dry aggregates (fine and coarse), cement and water. Cement was mixed with addition of 85% of water; after mixing by one minute, 15% of water was added and mixed for a total time of 5 minutes, in order to prevent fresh concrete from segregation.

Concrete with or without irradiated-tire particles was elaborated. For each concrete mixture ten specimens were casting in cylindrical molds of 150 mm diameter and 300 mm height, as well as two beams of 150x150x600 mm. After 24 hours, they were placed in a controlled temperature room at $23.0 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ and 95% of relative humidity. Cured process was performed in accordance with ASTM C511 standard.

The component concentrations of the concrete are shown in Table 1. Regarding the manufactured concrete replacing sand by waste tire particles, two different waste tire particle sizes were used [2.8 mm (mesh 7) and 0.85 mm (mesh 20)], having an approximate waste particle size ratio of 1:3. Moreover, three different concentrations of waste tire particles 10, 20 and 30% by volume were used. The mix code was labeled as: Mix-Concentration-Mesh; for example M-10-7 specimens means: Mix with 10% of waste tire of mesh size 7. The water/cement ratio was kept constant at 0.54.

Table 4. Components of concrete (1 m³).

Mix Code	Waste Tire (Vol%)	Waste Tire (kg)	Portland cement (kg)	Sand (kg)	Gravel (kg)	Water (kg)
M-0	0	0	337.1	758.5	662.6	286.3
M-10-7	10	36.2	337.1	596.4	758.5	278.4
M-20-7	20	72.4	337.1	530.1	758.5	270.6
M-30-7	30	108.7	337.1	463.8	758.5	262.7
M-10-20	10	47.2	337.1	596.4	758.5	278.4
M-20-20	20	94.5	337.1	530.1	758.5	270.6
M-30-20	30	141.7	337.1	463.8	758.5	262.7

Irradiation procedure

Waste tire particles were irradiated at 200 and 300 kGy with a ratio of 4 kGy/h. Then, these particles were added to the concrete mix and casting in molds. For irradiation process an irradiator Gammabeam 651-PT loaded with ⁶⁰Co pencils was used; and located at the Institute of Nuclear Sciences of the National Autonomous University of Mexico.

Mechanical Tests

Concrete specimens were tested after 28 days of curing time. Testing tolerance allowed was 28 days ± 12 hours according to ASTM C/192 M-00 standard. Compressive strength evaluation was carried out in a universal testing machine Controls 047H4 (Milano Italy) with capacity of 2000 kN; while flexural strength in an flexural testing machine Elvec 72-4 with capacity of 10 kN. The pulse velocity evaluation was carried out with an ultrasonic pulse velocity tester Controls 58E0048 with transmitter and receiver head (54 kHz) and pulse rate of 1/s.

Results

Unit Weight

The unit weights of concretes are shown in Figure 1. These results are discussed in terms of three parameters: concentration and size of the tire particles, as well as irradiation dose. Respect to particle concentration the unit weight diminishes progressively when it increasing; the lowest value is for concrete with 30% of particles, the reduction on the values means 10% lower than those for control concrete (1954 kg/cm³). Taking account the particle size, lower values are observed for small size (0.85 mm). Moreover, it is observed for all non-irradiated concrete lower values respect to control concrete. Thus a combination of small particle size and more particle concentration create lower unit weight of concrete. In fact the values decrease because waste tire particles are porous and then air content is increased in concrete mixtures generating low unit weight. This fact is in accordance with a related research in which the air content in concrete increases when using bigger rubber particles (Skripkiunas, 2007).

In the case of concretes with irradiated-waste tire particles a same behavior is observed: The values increase for 200 kGy of dose, and decrease lightly for 300 kGy. Nevertheless all irradiated concrete have higher values respect to non-irradiated ones. The maximum value obtained is 5% higher than those for control concrete. Thus, small lumps are formed when adding irradiated particles, then lower contractions are seen in concrete, and in consequence lower unit weight are obtained.

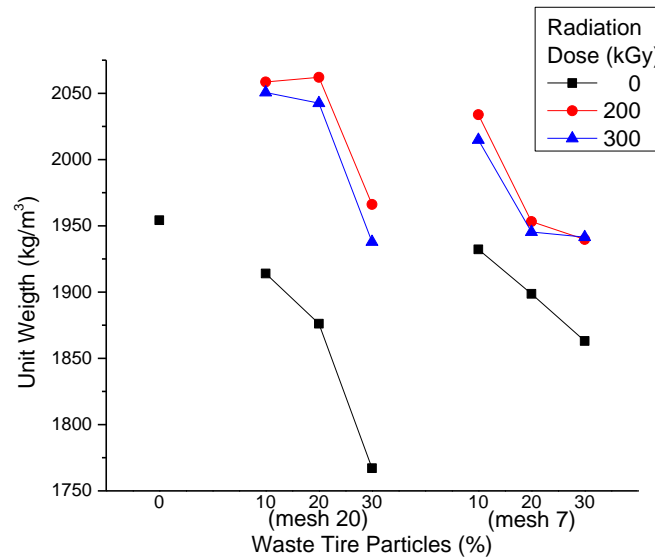


Figure 1. Unit weight of concrete with waste tire particles at different irradiated doses.

Compressive Strength

Compressive strength values of concretes are shown in Figure 2. The compressive strength values vary as a function of size and concentration of waste tire particles. For concrete with non-irradiated waste tire particles, the following behaviors are observed: a) The values decrease progressively according to the particle concentrations increase. For control concrete the compressive strength is 24.1 MPa, which is bigger than those for all concrete; b) Respect to the particle size, the compressive strength values are higher for concretes with particles of 2.8 mm than those with 0.85 mm. Thus, when increasing the waste particles concentration and adding large particles more air content is obtained which may cause micro-cracking and in consequence lower compressive values.

For concrete with waste irradiated tire particles the compressive strength values follow similar behaviors: they increase gradually according to irradiation dose increases. Due to irradiation, tire particles stiffen and do not allow the appearance of cracks, so the concrete can resist higher loads. The highest value at 300 kGy is obtained. It is important to mention that only concretes with 10% of concentration and 2.8 mm of particle size and irradiated at

200 or 300 kGy have higher values than those for control concrete. Such values mean 23% of improvement.

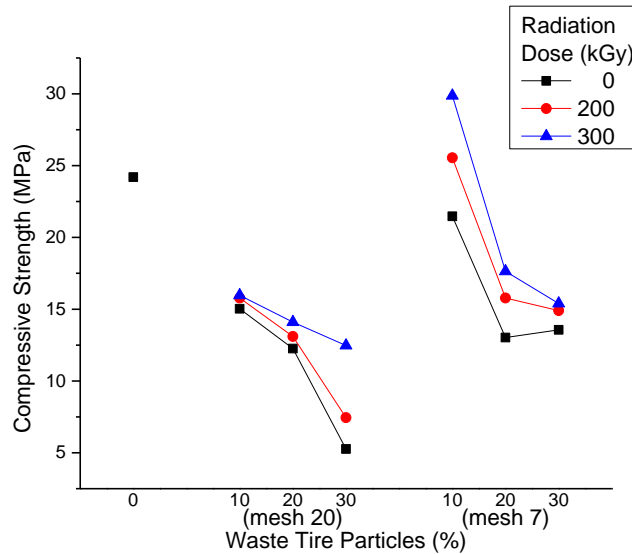


Figure 2. Compressive strength of concrete with waste tire particles 0.85 mm (mesh 20) and 2.8 mm (mesh 7).

Splitting Tensile Strength

Splitting tensile strength values of concretes are shown in Figure 3. For concrete with non-irradiated waste tire particles, the following behaviors are observed: a) respect to particle concentration, the values decrease when increasing the particle concentration; when considering the particle size, higher values are found for concrete with particles of 2.8 mm. However, all values are lower than those for control concrete.

The splitting tensile strength for concrete with irradiated waste tire particles shows a peculiar behavior: at 200 kGy the values decrease below of the control concrete value, nevertheless at 300 kGy the values increase, now above of the control concrete value. As in compressive strength, the stiffened tire particles prevent early failure due to cracks and increases tensile strength. Only concretes with 10% of concentration and 2.8 mm of particle size and irradiated at 300 kGy have higher values than those for control concrete. Such improvement is of 13 %.

For both kind of concrete, with irradiated or non-irradiated waste particles, the compressive and splitting tensile strength behavior is similar because the induced stresses generated in the specimens are of the same nature, is to say in the direction of the load application axis.

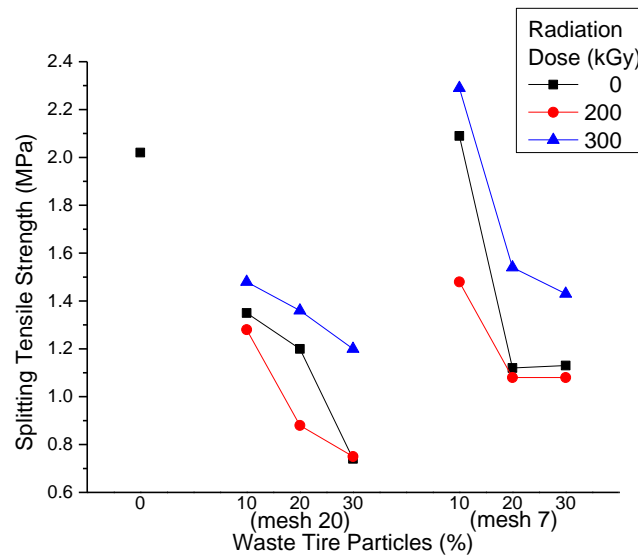


Figure 3. Splitting tensile strength of concrete with waste tire particles 0.85 mm (mesh 20) and 2.8 mm (mesh 7).

Figure 4 shows tire particles irradiated at 0 kGy, 200 kGy and 300 kGy. For non-irradiated waste tire a rough surface is observed, with particles of different sizes (Left image); when irradiating at 200 kGy smooth surfaces are created, with some small and disperse particles. Such smoothing is consequence of the cross-linking of polymer chains. For higher dose, 300 kGy, some cracks are observed, which are produced by scission of the polymer chains.

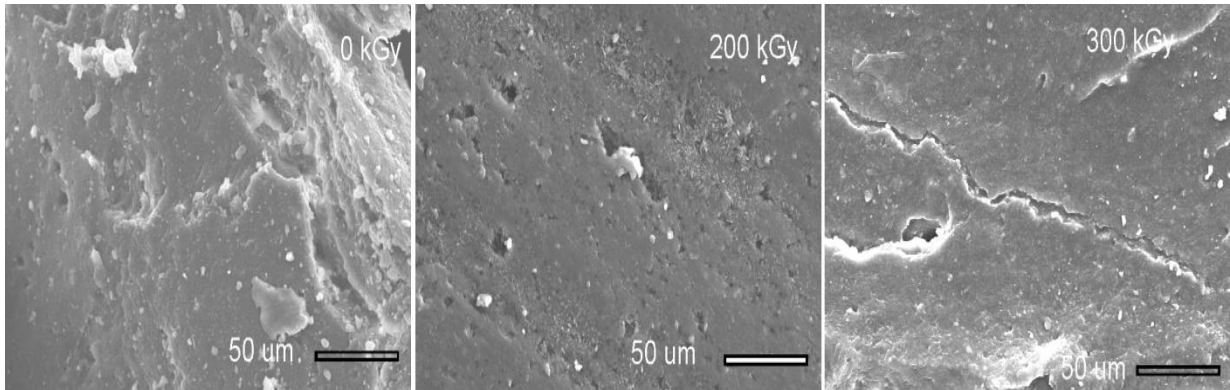


Figure 4. SEM image of waste tire particles at different irradiation dose.

Flexural Strength

The flexural strength values are shown in Figure 5. The results for concrete without irradiated particles indicate: a) Progressive diminution of values when increasing the concentration of particles; b) Variations in terms of the particle size, higher values are for concretes with particles of 2.8 mm. Inclusive, only concrete with 10% of waste particles have a higher value than those for control concrete; such improvement is of 10%.

For concrete with irradiated particles the flexural strength values are lower than those for control concrete. They have a detrimental diminution of 46% respect to control concrete. Results show similar behavior to compressive and tensile strength, this is because, during flexion, both phenomena occur at the same time, so there is a closely relationship in concrete with irradiated and non-irradiated particles.

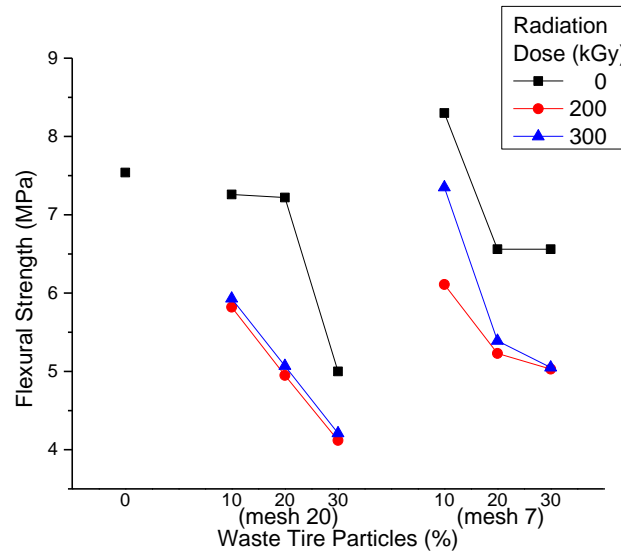


Figure 5 .Flexural strength of concrete with waste tire particles of 0.85 mm and 2.8 mm.

Modulus of Elasticity

The modulus of elasticity values are shown in Figure 6. As other mechanical features discussed in previous sections, the modulus of elasticity values follow similar behaviors: a) the values decrease when increasing the concentration of particles; b) The values are higher for concrete with particles of 2.8 mm. Nevertheless, the values are lower respect to control concrete. This is due to the concrete without tire particles is more rigid and does not allow large deformations so that the slope of its stress–strain curve in the elastic deformation region, elastic modulus is lower, a stiffer material will have a higher elastic modulus.

For concrete with irradiated particles, modulus of elasticity values have different behaviors: a) for concrete with particles of 0.85 mm, the values are higher when irradiating at 300 kGy; but b) for concrete with large particles (2.8 mm) the values diminish at 200 kGy, respect to control concrete; for higher radiation dose (300 kGy) the values are higher. Inclusive concrete with 10% of irradiated particles have a value higher than those for control concrete which means an improvement of 20%,

According to mechanical concepts there is a correlation between the compressive strength and the modulus of elasticity values, also between modulus of elasticity and the unit weight. In both cases, waste particles contribute to higher deformations and lower crack formation as well as lower unit weights in concrete; which results in lower modulus of elasticity. Moreover, when applying gamma radiation, only tire particles are reinforced, this does not increase the modulus of elasticity because the strain resistance is given by the concrete and not for the tire particles.

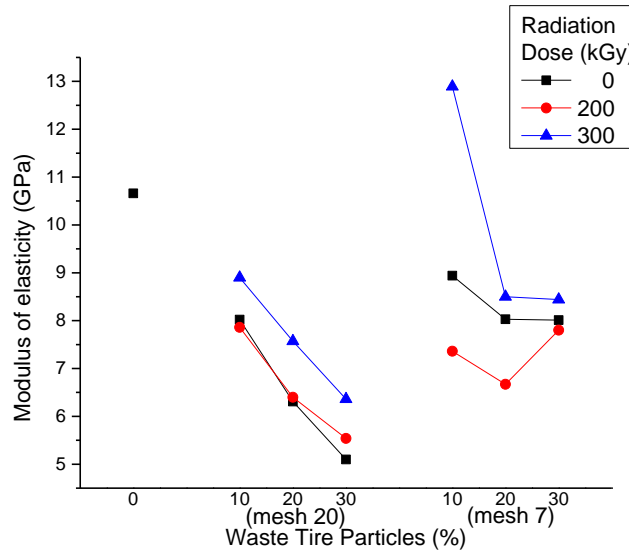


Figure 6. Modulus of elasticity of concrete with waste tire particles of 0.85 mm and 2.8 mm.

Pulse Velocity

In Figure 7 the ultrasonic pulse velocities applied to concrete are shown. For concrete with non-irradiated particles the values decrease when increasing the concentration of waste tire particles; and they are bigger when using larger particles of 2.8 mm; moreover, the highest value corresponds to control concrete.

In the case of concrete with irradiated waste particles, a similar behavior is observed: the values diminish when increasing the irradiation dose. Detrimental values are 56% lower respect to control concrete value. Moreover, since tire particles stiffen by gamma radiation, these do not allow the propagation of sound waves, that is, energy dissipation.

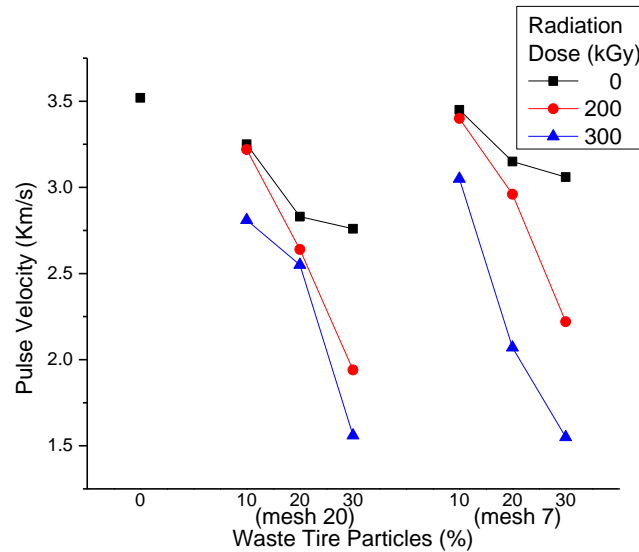


Figure 7. Pulse velocity of concrete with waste tire particles of 0.85 mm and 2.8 mm.

Conclusions

The results show that gamma radiation as well as concentration and size of waste tire particles are adequate tools for improvement of the mechanical properties of hydraulic concrete. It can be seen that, in concentrations no greater than 10% with 2.8 mm particle sizes and 300 kGy were obtained higher results than the control concrete for compressive strength, tensile strength and elastic modulus. This because radiation hardens the tire particles which prevent earliest cracks and soon failure, also increased unit weight values. Also were obtained lower results for velocity pulse which indicate energy absorption, desirable characteristics for industrial applications.

Acknowledgements

To National Council for Science and Technology of México (CONACYT), for both the scholarship support of one of the author (E.S.H.-S.), and the achievement of this research; and to Environmental Sciences Graduate Program of the Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM).

References

Aiello, M.A., Leuzzi, F., Centonze, G., Maffezzoli, A., 2009. Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: pull-out behaviour, compressive and flexural strength. *Waste Management* 29, 1960–1970.

Al-Tayeb, M.M., Abu Bakar, B.H., Akil, H.M., Ismail, H., 2012a. Effect of partial replacements of sand and cement by waste rubber on the fracture characteristics of concrete. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 51 (6), 583-589.

Barbuta, M, Hrja, M. 2008. Properties of fiber reinforced polymer concrete. *Bull. Instrum. Polit.* 43, 13–22.

Benazzouk, A., Douzane, O., Langlet, T., Mezreb, K., Roucoult, J.M., Quéneudec, M., 2007. Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes. *Cement & Concrete Composites* 29, 732–740.

Bravo, M., de Brito, J., 2012. Concrete made with used tyre aggregate: durability related performance. *J. Clean. Prod.* 25, 42-50.

Clough, R.L. 2001. High-energy radiation and polymers: a review of commercial processes and emerging applications. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* 185, 8–33.

Cruz-Zaragoza, E., Martínez-Barrera, G. 2009. Ionizing radiation effects on the matter and its applications in research and industry. In: Barrera-Díaz C., Martínez-Barrera G., Editors. *Gamma radiation effects on polymeric materials and its applications*. Kerala India: Research Signpost, pp. 1–14.

Fattuhi, N.I., Clark, L.A., 1996. Cement based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. *Construction and Building Materials* 10, 229–236.

Elleuch, L., Dubois, F., Rappenau, J., 1971. Behavior of special shielding concretes and of their constituents under neutron irradiation. Fourth United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, p. 7

Herrera-Sosa, E.S., Martínez-Barrera, G., Barrera-Díaz, C., Cruz-Zaragoza, E., 2014, Waste tire particles and gamma radiation as modifiers of the mechanical properties of concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 327856, 7 pages.

Kelly, B., Brocklehurst, J., Mottershead, D., McNearney, S., 1969. The effects of reactor radiation on concrete, Proceedings of the Second Information Meeting on Pre Stress Concrete and Reactor Pressure Vessels and their Thermal Isolation, Brussels, pp. 237–265.

Le Pape, Y., Field, K.G., Remec, I., 2015. Radiation effects in concrete for nuclear power plants, Part II: Perspective from micromechanical modeling. *Nuclear Engineering and Design* 282, 144–157.

Mohammed, B.S., Anwar Hossain, K.M., Eng Swee, J.T., Wong, G., Abdullahi, M., 2012. Properties of crumb rubber hollow concrete block. *J. Clean. Prod.* 23, 57-67.

Neocleous, K., Pilakoutas, K., Waldron, P., 2006a. From used tyres to concrete fibre reinforcement. In: Proceedings of the 2nd FIB Congress, Italy.

Neocleous, K., Tlemat, H., Pilakoutas, K., 2006b. Design issues for concrete reinforced with steel fibres including fibres recovered from used tyres. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2006, 677–685.

Pelisser, F., Zavarise, N., Longo, T.A., Bernardin, A.M., 2011. Concrete made with recycled tire rubber: effect of alkaline activation and silica fume addition. *J. Clean. Prod.* 19 (6), 757-763.

Scagliusi S. R. , Cardoso E. L. C., Lugao A. B., 2012. Effect of gamma radiation on chlorobutyl rubber vulcanized by three different crosslinking systems. *Radiation Physics and Chemistry* 81, 1370–1373.

Siddique, R., Naik, T.R., 2004. Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview. *Waste Management* 24, 563–569.

Skripkiunas, G., Grinys, A., Dauksys M., Using tires rubber waste for modification of concrete properties, in *Sustainable Construction Materials and Technologies*, Chun, Y.-M., Claisse P., Naik, T.R., Ganjian E., Eds., Taylor & Francis Group, London, 2007. pp. 85-90,

Sonnier, R., Leroy, E., Clerc, L., Bergeret, A., Lopez-Cuesta, J.M., 2006. Compatibilisation of polyethylene/ground tyre rubber blends by γ irradiation, *Polymer Degradation and Stability* 91, 2375-2379.

Sui, H.L., Liu, X.Y., Zhong, F.C., Li, X.Y., Wang, L., Ju, X., 2013. Gamma radiation effects on polydimethylsiloxane rubber foams under different radiation conditions. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 307, 570–574.

Tariq Yasin, Sara Khan, Muhammad Shafiq, Rohama Gill, 2015. Radiation crosslinking of styrene-butadiene rubber containing waste tire rubber and polyfunctional monomers. *Radiation Physics and Chemistry*, Volume 106, January 2015, Pages 343-347

Tlemat, H., Pilakoutas, K., Neocleous, K., 2004a. Demonstrating steel fibres from waste tyres as reinforcement in concrete: material characterisation. In: Liguori (Ed.), *Proceedings of the First International Conference on Innovative Materials and Technologies for Construction and Restoration*, Varenna, Italy, vol. 1, pp. 172–185.

Tlemat, H., Pilakoutas, K., Neocleous, K., 2004b. Design considerations on the use of steel fibres from waste tyres as reinforcement in concrete. In: Liguori (Ed.), *Proceedings of the First International Conference on Innovative Materials and Technologies for Construction and Restoration*, Varenna, Italy, vol. 1, pp. 611– 619.

Topcu, I.B., 1995. The properties of rubberized concretes. *Cem.Concr. Res.* 25 (2), 304-310.

Topcu, I.B., Avcular, N., 1997a. Collision behaviours of rubberized concrete. *Cem. Concr. Res.* 27 (12), 1893-1898.

Topçu, I.B., Avcular, N., 1997b. Analysis of rubberized concrete as a composite material. *Cement and Concrete Research* 27, 1135–1139.

Yasin, T., Khan, S., Shafiq, M., Gill, R., 2015. Radiation crosslinking of styrene–butadiene rubber containing waste tire rubber and polyfunctional monomers. *Radiation Physics and Chemistry* 106, 343–347.

Conflict of Interests

The authors do not have a direct financial relation or conflict of interests with the commercial identities mentioned in this submitted paper, and the commercial trademarks such as Controls and Elvec, only were reported to guarantee the reproducibility, in the same conditions, of the different tests.

7. DISCUSIÓN GENERAL

7.1. Elaboración de Concretos Testigo.

Los resultados obtenidos en este proyecto tienen por objeto el análisis y la discusión de la factibilidad de sustituir como agregado fino partículas de elastómero proveniente de llantas recicladas a la mezcla de concreto hidráulico que se usa comúnmente en la industria de la construcción. Si bien es cierto, en materia ambiental los beneficios son muchos ya que la problemática en la disposición de las llantas fuera de uso es muy grave en México y a nivel internacional.

Es de suma importancia mencionar que todas las pruebas de laboratorio se realizaron bajo las especificaciones de las Normas Oficiales Mexicanas vigentes, esto con la intención de que los resultados obtenidos se encuentren bajo un marco normativo y tengan validez.

Acerca de los agregados empleados, es pertinente decir que después de realizar las pruebas, los resultados arrojan que dichos materiales se encuentran dentro los parámetros de aceptación según el marco normativo, sin embargo se consideran de baja calidad, aun así, son los que se comercializan comúnmente dentro de la zona metropolitana del Distrito federal y la zona conurbada del Edo. de México .

Durante el proceso del diseño de la mezcla no represento ningún problema y se obtuvieron resultados satisfactorios. En lo referente al concreto hidráulico con el que se fabricaron los cilindros testigo el resultado es muy alentador ya que la mezcla se diseñó para 250 kg/cm^2 y la resistencia a compresión en promedio obtenida fue de 247 kg/cm^2 y con una baja dispersión obtenida en los resultados.

En cuanto a las mezclas a las que se les adicionaron la partículas de elastómero de llanta, la resistencia a compresión fue disminuyendo conforme aumentaba el porcentaje del agregado; para la granulometría de 2.8 mm (7 Mesh) la mayor pérdida de resistencia fue del 40% de la resistencia máxima esperada aproximadamente y para la granulometría de 20 mesh la mayor pérdida de resistencia fue del orden del 75% aproximadamente. En suma lo anterior nos indica que, mientras más pequeño es el tamaño del agregado menor es la

resistencia a compresión, algo que se contrapone a lo consultado en algunas fuentes consultadas, (El-Dieb, 2001; Eldin, 1993).

En el caso del módulo de elasticidad el análisis es un poco más elaborado. Primero se debe mencionar que para los concretos elaborados, se obtuvo un peso volumétrico promedio de 1900 kg/m^3 dato que sirvió para poder comparar con el valor teórico del módulo de elasticidad.

En el análisis y diseño de estructuras de concreto reforzado es utilizado el módulo de elasticidad (Módulo de Young) del concreto E_c , parámetro relacionado con la resistencia a compresión del mismo. Por ejemplo, en Colombia, el módulo de elasticidad usado en el diseño estructural está basado en los valores recomendados en la “Norma Sismo Resistente de 1998 (NSR-98)”. Para el caso colombiano se tiene un valor medio a utilizar sin considerar el origen del agregado, el cual está definido en el NSR-98 por la ecuación $E_c=12,500\sqrt{f_c}$ en kg/cm^2 . Sin embargo, son varias las ecuaciones que se han planteado en diferentes países para estimar E_c .

Por otro lado, evaluando la fórmula propuesta por el ACI, se recomienda utilizar esta ecuación cuando se tenga conocimiento del peso volumétrico (W) del concreto y trabajar la ecuación ajustada a $E_c=0.054 W^{1.5} \sqrt{f_c}$ en Kg/cm^2 . Investigaciones indican que para concretos con $W = 2,375 \text{ Kg/m}^3$ y $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, la ecuación propuesta por el NSR-98 sobrestima los valores de E_c en un 50%, entre tanto que la ecuaciones propuestas por el ACI y el CEC (Método del Comité Europeo del Concreto) sobrestiman el E_c en un 24% y 46.2% respectivamente.

A continuación se presentan diversas ecuaciones para calcular el módulo de elasticidad estático.

Método del Turkish Institution of Standards	→	$E_c=14,000 + 3,250 f_c^{1/2}$
Método del Comité Europeo del Concreto (CEC)	→	$E_c=9,500(f_c + 8)^{1/3}$
Método del American Concrete Institute (ACI)	→	$E_c=0.043 W^{3/2} f_c^{1/2}$
Método de las NTC, México	→	$E_c= 8000\sqrt{f_c}$ en kg/cm^2

Para efectos de la presente investigación, se trabajó con lo indicado por la NTC del RCDF-Concreto, con lo cual nos da un valor de $E_c = 126,490 \text{ kg/cm}^2$ (teórico) y el valor obtenido fue de $E_c = 108,730 \text{ kg/cm}^2$ (experimental) que es aproximadamente el 85% del valor teórico antes mencionado.

Para el caso de la resistencia a tensión por compresión diametral se puede observar que los resultados se acercan mucho a lo que se esperaba en base a la información teórica, esto es que, la resistencia a la tensión del concreto es aproximadamente el 10% de la respectiva a compresión para el caso de los testigos. Llama la atención que para el agregado en polvo de 0.85 mm (20mesh) la resistencia aumenta hasta llegar a 14% de la respectiva a compresión para los especímenes con 30% de agregado de este mismo agregado (20 mesh). Esto se puede deber a que el agregado en polvo favorece la adherencia con el concreto en cambio los especímenes con agregado de 2.85 mm presentaron fallas que indican la falta de adherencia. Lo anterior se muestra en las siguientes figura.

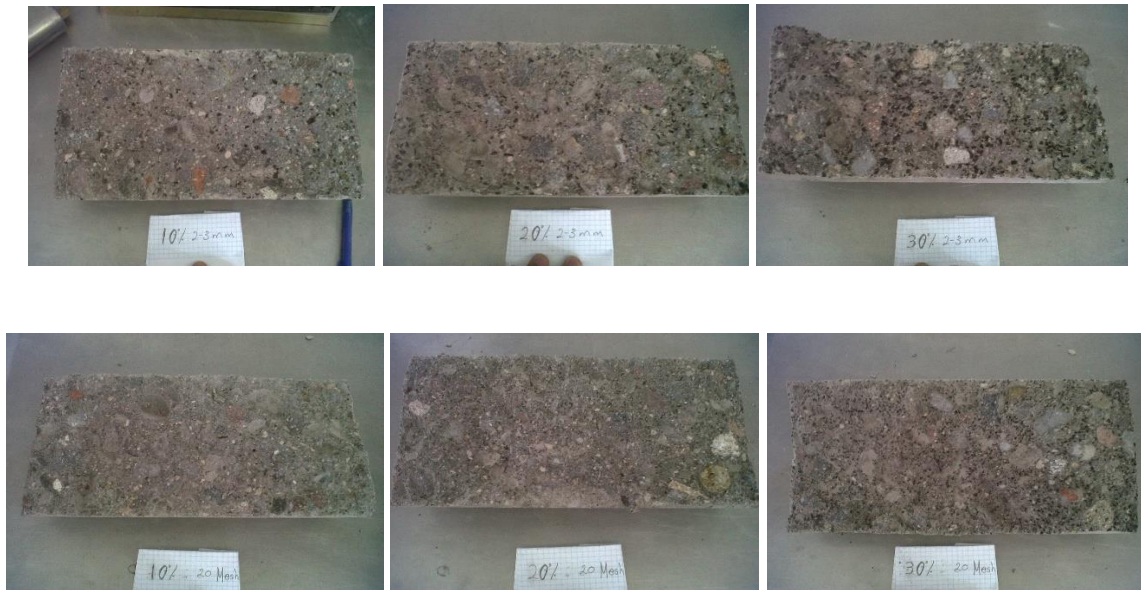


Figura 7 Concretos elaborados con partículas de llanta a diferentes concentraciones

Al analizar otros aspectos de la influencia del tamaño del agregado, durante el proceso de fabricación de los especímenes se observó que a mayor porcentaje de adición del

agregado se perdía trabajabilidad y para el agregado de 0.85 mm (20 mesh) se favorecía el rápido sangrado en las mezclas.

7.2 Concretos elaborados con partículas de llanta previamente irradiadas.

La Figura 8 presenta el porcentaje de ganancia o pérdida de los concretos sin irradiar e irradiados, con partículas de llanta de 2.8 mm, de las propiedades de:

- Peso Volumétrico (PV)
- Resistencia a la compresión ($f'c$)
- Resistencia a la Tensión (T)
- Resistencia a la flexión (f_r)
- Módulo de elasticidad (E)
- Velocidad de Pulso (Vp)

Tomando los resultados del concreto testigo (0% de partículas de llanta y sin irradiar) como el 100%.

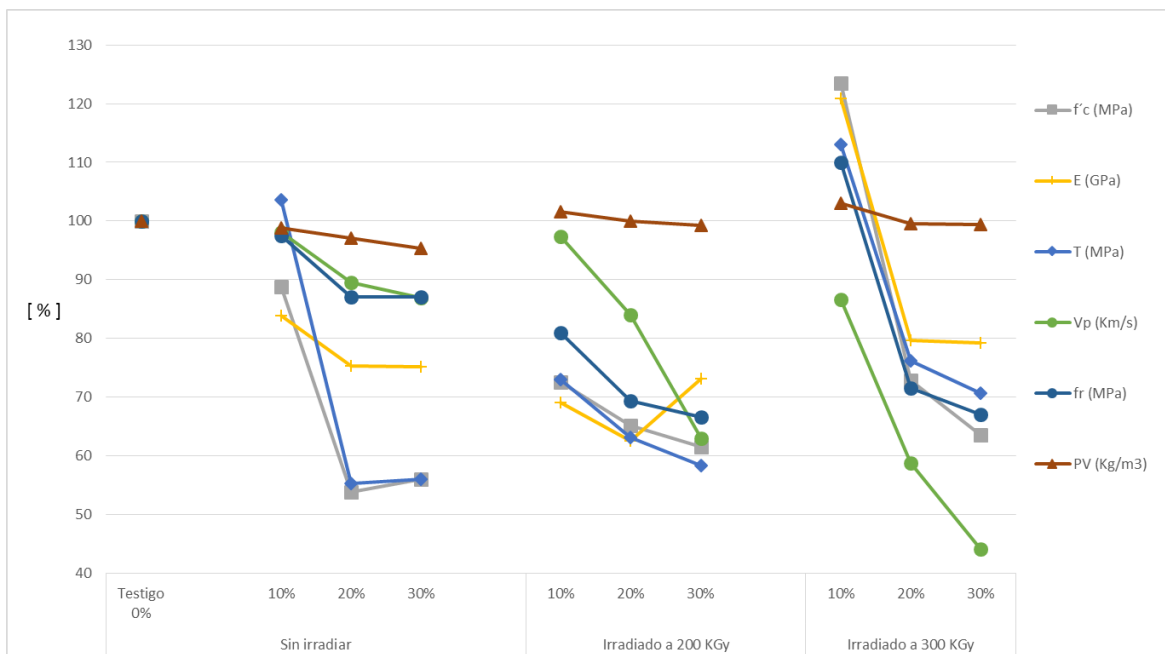


Figura 8. Porcentaje de pérdida o ganancia de las propiedades de los concretos con partículas de llanta de 2.80 mm a diferentes irradiaciones.

La Figura 9 presenta la comparación para los concretos con partículas de llanta de 0.85 mm (20 mesh), tomando los resultados del concreto testigo (0% de partículas de llanta irradiada y sin irradiar) como el 100%.

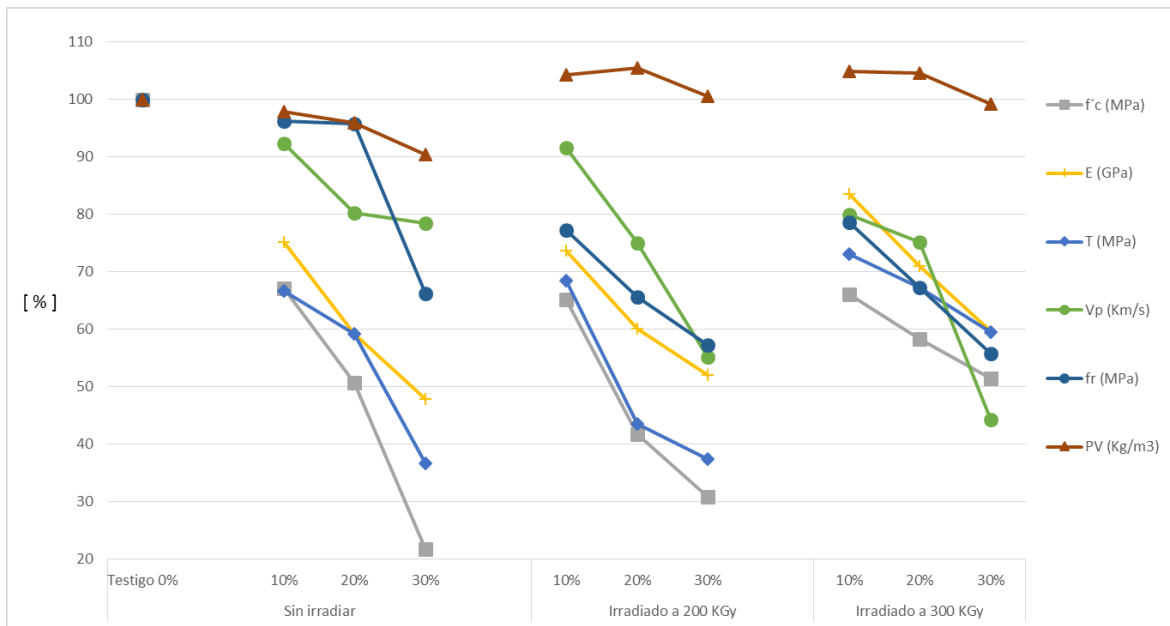


Figura 9. Porcentaje de pérdida o ganancia de las propiedades de los concretos con partículas de llanta de 0.85 mm a diferentes irradiaciones.

7.2.1 Peso Volumétrico (PV)

Estos resultados se discuten en términos de tres parámetros: la concentración y el tamaño de las partículas de llanta, así como la dosis de irradiación. Respeto a la concentración de partículas, el peso unitario disminuye progresivamente cuando esta aumenta; el valor más bajo es para el concreto con 30% de partículas en sustitución del agregado fino. Tomando en cuenta el tamaño de las partículas, se observa que los valores más bajos son los del concreto con partículas más pequeñas (0,85 mm). Por otra parte, se observa para todo el concreto elaborado con partículas sin irradiar, los valores son inferiores a los del concreto testigo (1954 kg/m³). Así, una combinación de tamaño de partícula pequeño y más concentración alta de partículas crea peso volumétrico inferior de concreto.

De hecho, los valores disminuyen porque las partículas de llantas de desecho son porosas y el contenido de aire se incrementa en las mezclas de concreto que generan bajo peso unitario. Este hecho se contrapone a previas investigaciones que dictan que el contenido de aire se incrementa en el concreto cuando se usa partículas de hule más grandes (Skripkiunas, 2007).

En el caso de concretos con partículas de llanta irradiada, se observa el mismo comportamiento: Los valores aumentan a 200 kGy de dosis, y disminuyen ligeramente para 300 kGy. Sin embargo todo el concreto irradiado tiene valores más altos respecto a los no irradiados. El valor máximo obtenido es del 5% superior a las del concreto testigo. Se pudo observar que el volumen de los testigos disminuyó luego del fraguado, en consecuencia se obtuvieron pesos volumétricos secos menores.

7.2.2. Resistencia a la compresión ($f'c$)

Los valores de resistencia a la compresión varían en función del tamaño y a la concentración de partículas de llantas de desecho. Para concreto con partículas de llanta sin irradiar, se observan los siguientes comportamientos: Los valores disminuyen progresivamente cuando las concentraciones de partículas aumentan. Para el concreto testigo, la resistencia a la compresión fue mayor que la de concretos elaborados con partículas de llanta sin irradiar; siendo el valor más alto para el concreto con un 10% de partículas de 2,8 mm, tal valor es un 11% inferior a las de control de concreto.

Con respecto al tamaño de partícula, los valores de resistencia a la compresión son más altos para concretos con partículas de 2,8 mm que aquellos con partículas de 0,85 mm. Al aumentar la concentración de partículas de llanta y la adición de partículas grandes, se obtiene mayor contenido de aire atrapado que puede causar micro fisuras y en consecuencia una disminución en los valores de resistencia a la compresión.

Para concreto con partículas irradiadas de llantas los valores de resistencia a compresión siguen comportamientos similares pero aumentan gradualmente según aumenta la dosis

de irradiación. Debido a la irradiación, las partículas de neumáticos se endurecen y no permiten la aparición de grietas, por lo que el concreto puede resistir cargas más altas. El valor más alto se obtuvo a 300 kGy. Es importante mencionar que sólo los concretos con 10% y 2,8 mm de tamaño de partícula e irradiados a 200, 250 y 300 kGy tienen valores más altos que los del concreto testigo. Estos valores significan el 23% de mejora. Los concretos con partículas de 2.8 mm tienen valores mayores que aquellos con 0,85 mm. Los concretos con 10%, 20% y 30% de partículas irradiadas tienen valores más altos cuando se comparan al concreto con partículas sin irradiar. Por lo tanto, es más conveniente el uso de partículas de tamaño más grandes en lugar de pequeñas, así como una dosis más alta de irradiación.

7.2.3. Resistencia a la Tensión (T)

Para concreto con partículas de llanta sin irradiar, se observan los siguientes comportamientos: Los valores disminuyen al aumentar la concentración de partículas siendo el valor más alto para el concreto con un 10% de las partículas de 2.8 mm, este valor es 6% menor que los de control de concreto. Los concretos con partículas de 2.8 mm tienen valores más altos que los de 0.85 mm.

Para el concreto con partículas de llanta irradiada, la resistencia a la tensión también disminuye al aumentar la concentración de partículas siendo el valor más alto para el concreto con un 10% de las partículas de 2,8 mm, que es 27% menor que los del concreto testigo. Por otra parte, los valores más altos se consideran para el concreto con partículas de 2,8 mm. Como se puede apreciar con los valores de resistencia a la compresión, la resistencia a la tensión tiene un comportamiento similar: los valores para el concreto con 10%, 20% y 30% de las partículas irradiadas son mayores que los de concreto con partículas sin irradiar.

La resistencia a la tensión indirecta del concreto con partículas de llantas irradiadas muestra un comportamiento peculiar: a 200 kGy los valores disminuyen por debajo del valor del concreto testigo, sin embargo, a 300 kGy presenta valores por encima del concreto testigo. Como en la resistencia a la compresión, las partículas de llantas rígidas previenen la falla prematura debido a las grietas y aumenta la fuerza de tracción. Solamente los concretos

con 10% y 2,8 mm de tamaño de partícula a 300 kGy tienen valores más altos que los del concreto testigo. Tal mejora es del 13%.

Para ambos tipos de concreto, con partículas de llanta sin irradiar e irradiadas, el comportamiento de resistencia a la compresión y a la tensión indirecta es similar debido a que los esfuerzos inducidos en los especímenes son de la misma naturaleza, actúan en la dirección del eje de aplicación de la carga.

7.2.4. Resistencia a la flexión (fr)

En los resultados para el concreto elaborado con partículas sin irradiar se aprecia una disminución progresiva de los valores cuando se aumenta la concentración de partículas. En términos del tamaño de partícula, los valores más altos son para concretos con partículas de 2,8 mm. Inclusive, sólo el concreto con un 10% de partículas de llanta tienen un valor más alto que los del concreto control; dicha mejora es de 10%.

Para el concreto con partículas irradiadas los valores de resistencia a la flexión son inferiores a las del concreto testigo. Se tienen una disminución perjudicial de 46% respecto a los testigos. Pero la tendencia en los resultados muestran un comportamiento similar a la resistencia a compresión y resistencia a la tensión, esto es debido a que, durante la flexión, ambos fenómenos se producen al mismo tiempo, por lo que hay una relación estrecha en los resultados tanto para concretos con partículas de llanta irradiadas y sin irradiar.

7.2.5. Módulo de elasticidad (E)

Los valores del módulo de elasticidad como otras características mecánicas discutidas en las secciones anteriores, sigue comportamientos similares: los valores disminuyen al aumentar la concentración de partículas; los valores son más altos para el concreto con partículas de 2,8 mm. Sin embargo, los valores son inferiores respecto a los del concreto testigo. Esto es debido a que el concreto elaborado sin partículas de llanta es más rígido y no permite grandes deformaciones de modo que la pendiente de la curva de esfuerzo-

deformación en el rango elástico es más grande que para concretos que resisten menores esfuerzos y se deforman más.

Para el concreto con partículas de llanta irradiadas, los valores de módulo de elasticidad presenta diferentes comportamientos: para el concreto con partículas de 0,85 mm, los valores son más altos cuando se irradian a 300 kGy; pero para el concreto con partículas grandes (2,8 mm) los valores disminuyen a 200 kGy, respecto al concreto testigo; para la dosis de radiación más alta (300 kGy) los valores son mayores. Inclusive en concretos elaborados con 10% de las partículas de llanta irradiadas se tiene un valor más alto que los de los testigos, lo que significa una mejora de 20%,

De acuerdo con los conceptos mecánicos, existe una correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, y también entre el módulo de elasticidad y el peso volumétrico. En ambos casos, las partículas de llanta contribuyen a permitir deformaciones superiores, una menor formación de grietas, y pesos unitarios más bajos en el concreto, lo que se traduce en un menor módulo de elasticidad.

Por otra parte, al aplicar radiación gamma, sólo las partículas de llanta aumentan su resistencia, esto no aumenta el módulo de elasticidad, debido a que la resistencia a la deformación está dada por el concreto y no para las partículas de llantas.

7.2.6. Velocidad de Pulso (Vp)

Para concreto con partículas sin irradiar los valores disminuyen al aumentar la concentración de partículas de llantas de desecho; y son más grandes cuando se utilizan partículas mayores de 2.8 mm; Por otra parte, el valor más alto corresponde al concreto testigo, esto indica que existe una mayor absorción de energía al no permitir la propagación de la onda sonora, esto se debe a las propiedades elásticas de las partículas de llanta que al ser golpeadas por el ultrasonido, no permiten el paso de la onda absorbiéndola y dando valores menores de velocidad de pulso.

En el caso del concreto con partículas de llanta irradiados, se observa un comportamiento similar: los valores disminuye al aumentar la dosis de irradiación. Estos valores son 56% más bajos respecto a los valores del concreto testigo. Por otra parte, ya que las partículas de llanta se endurecen por la radiación gamma, éstos no permiten la propagación de las ondas de sonido, es decir, disipan la energía.

7.3. Superficies de las fibras sin irradiar e irradiadas

En esta sección se analizan los efectos causados por la radiación gamma en las partículas de llantas; y la relación de éstas con los resultados de las propiedades mecánicas analizados previamente. Como se ha visto las propiedades mecánicas del concreto hidráulico reforzado con partículas elastoméricas de llantas recicladas, dependen tanto del contenido como del tamaño de las partículas utilizadas.

De acuerdo con la literatura, los refuerzos obtenidos a partir de llantas automotrices que se utilizan en concreto a base de cemento se clasifican de acuerdo con sus dimensiones, éstos son: elastómero granulado (75 μm - 4.75 mm), cribado (0.15 – 10 mm), y rasgado (150 – 300 mm) (Siddique 2004).

En la Figura 9 se muestran partículas de llanta sin irradiar e irradiadas a 200 kGy, 250 kGy y 300 kGy. En las partículas sin irradiar (0 kGy) se observan superficies rugosas de diferentes tamaños; cuando se irradian a 200 kGy se crean superficies más lisas en algunas zonas, definiéndose cavidades en forma aleatoria. Tal suavizado es consecuencia del entrecruzamiento de las cadenas de polímero. Para 250 kGy se observa la aparición de las primeras grietas producidas por la escisión de las cadenas poliméricas. Para dosis más alta, 300 kGy, se observan grietas generalizadas dejando expuesta una superficie más rugosa.

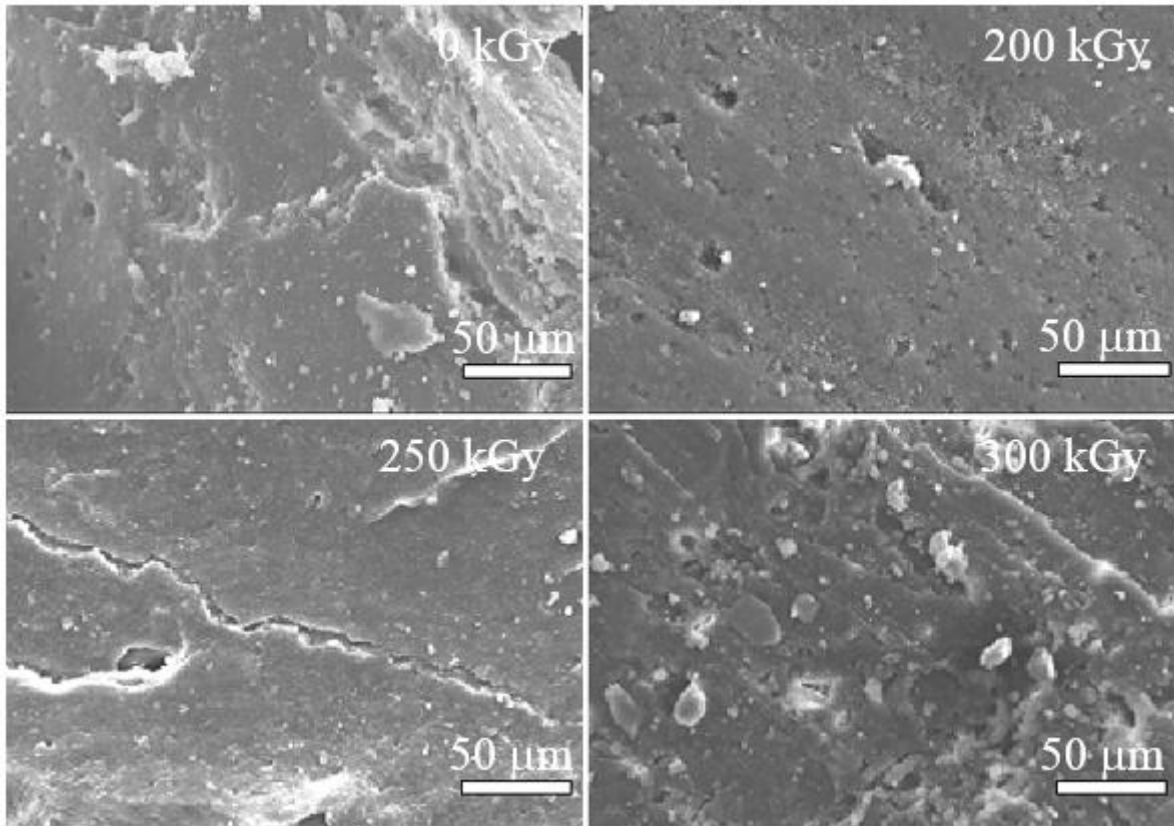


Figura 10. SEM Imagen de partículas de llanta a diferentes dosis de irradiación.

Las imágenes SEM reafirman los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas. Para el caso de concretos con partículas irradiadas a 300 kGy se obtuvieron mayores resistencias en tensión, flexión y compresión; en este caso las partículas presentan superficies con mayor degradación, lo cual contribuye al incremento de estas propiedades. Para el caso de concretos con partículas irradiadas a 200 kGy se encontraron las mayores deformaciones; este tipo de partículas irradiadas presenta menor degradación superficial, lo que permite que el concreto tenga mayor deformación.

En términos generales, las partículas con mayor degradación superficial poseen mayor grado de “anclaje” que las superficies más lisas o uniformes; esto permite mayor grado de adherencia entre las partículas y matriz cementante, indispensable para la mejora de las propiedades mecánicas del concreto. Más aún, cuando se añade mayor cantidad de partículas de cierto tamaño en los concretos, se pueden llenar los poros de la matriz, logrando una mejor interacción elastómero - cerámico.

7.4. Resistencia a la compresión de concretos con partículas de llanta e irradiados posteriormente

La Figura 10 muestra los resultados de resistencia a compresión de los concretos elaborados con partícula de llanta, y que fueron irradiados después de que alcanzaron su resistencia máxima dentro de cuarto de curado. Se puede apreciar que el concreto por si solo aumenta la resistencia a la compresión al ser expuesto a la irradiación, la dosis de 200 kGy presenta un aumento del 3% y del 17% para una tasa de 300 kGy. Para las otras mezclas a dichas tasas, los valores son menores a los del concreto testigo y a sus contrapartes elaborados con partículas previamente irradiadas.

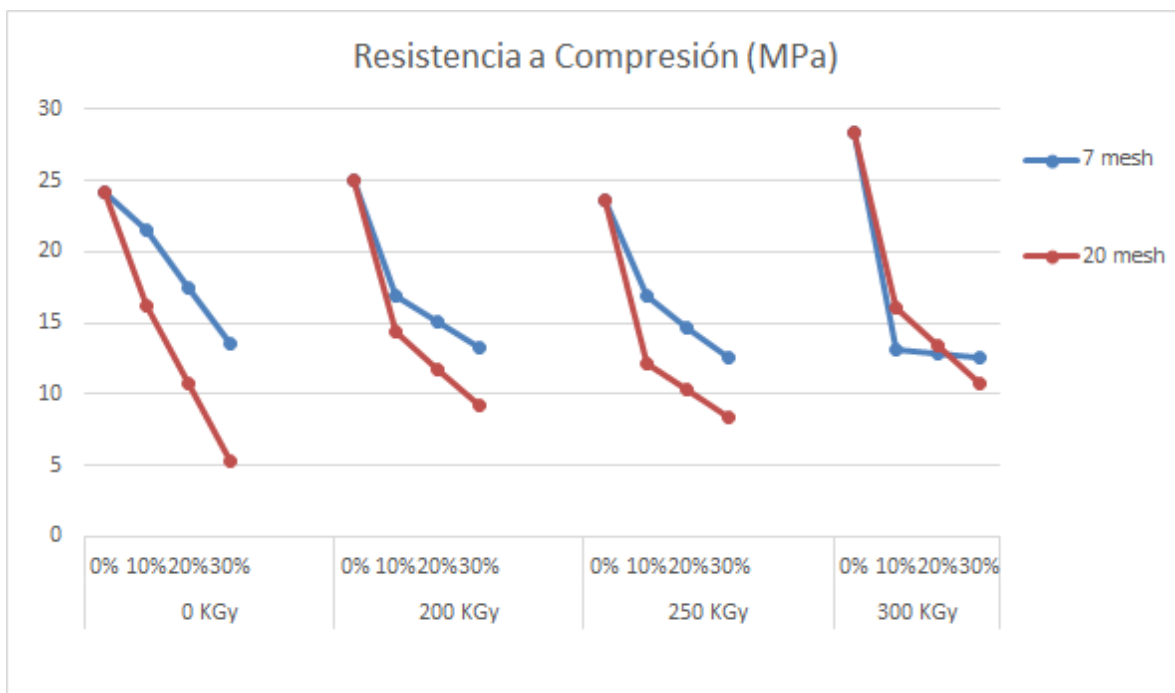


Figura 11. Resistencia a la Compresión de Concretos Irradiados posteriormente a su fabricación con partículas de llanta de diferentes tamaños.

8. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos, se puede apreciar que la mejor opción es irradiar previamente las partículas de llanta y controlar el porcentaje que se adicionan a la mezcla; con el fin de obtener cuando menos la resistencia de diseño, aprovechando la mayor cantidad de elastómero de llanta, contribuyendo así a dar uso al material de desecho, propiciando un beneficio al medio ambiental y confiriendo al concreto el beneficio de la absorción de energía bajo vibraciones o impactos.

Para estos concretos, los resultados muestran que la radiación gamma, así como la concentración y el tamaño de las partículas de llanta de desecho son herramientas adecuadas para la mejora de las propiedades mecánicas del concreto hidráulico. Se puede observar que, en concentraciones no superiores al 10% con tamaños de partícula 2,8 mm y 300 kGy se obtuvieron resultados más altos que los del concreto testigo para la resistencia a la compresión, resistencia a la tensión y el módulo elástico. Esto porque la radiación produce en las partículas de llanta mayor rigidez, que impiden la aparición de grietas y su pronto fallo, también aumentan los valores de peso volumétrico. Así mismo, se obtuvieron resultados más bajos de velocidad de pulso, lo que propicia absorción de energía, características deseables para aplicaciones industriales.

En aras de poder aprovechar esta tecnología, deberá buscarse la forma adecuada de procesar de manera industrial no solo la fabricación de estos concretos, sino también la irradiación de las partículas previa a su inclusión en las mezclas, y además la optimización en los tiempos de preparación de los concretos; lo que determinará el costo final del producto y su aceptación dentro de la industria de la construcción.

9. REFERENCIAS

- American Society for Testing Materials (ASTM). "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory". ASTM C/192/C 192M-00. USA. pp 1-8 (2000).
- American Society for Testing Materials (ASTM). "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens". ASTM C 39/C 39M-01. USA. pp 1-5 (2001).
- American Society for Testing Materials (ASTM). "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third Point Loading)". ASTM C 78-00. USA. pp 1-3 (2000).
- American Society for Testing Materials (ASTM). "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression". ASTM C 469 – 94. USA. pp 1-4 (1994).
- Amirkhanian S.N. "Utilization of Crumb Rubber in Asphaltic Concrete Mixtures- South Carolinas's Experience". Research report. South Carolina Department of Transportation (2001).
- Briodsky H. "The Important Role Retreads Can Play in Reducing the Scrap Tyre Problem". Recycling and Use of Used Tyres, Dhir, R.K. et al., eds., Thomas Telford, London (2001).
- Brown L., "Química: Ciencia Central". Paerson Educación, México (2004).
- Brown K.M., Cumming R., Morzek J.R., Terrebonno P., "Scrap Tire Disposal: Three Principles for Policy of Choice". *Natural Resources Journal* 41 (1) (2001) 9-22.
- Buttafava A., Consolati G., Mariani M., Quasso F., Ravasio U. "Effects induced by gamma irradiation of different polyesters studied by viscometry, thermal analysis and positron annihilation spectroscopy". *Polymer Degradation and Stability* 89 (2005)133-139.

- Chapiro A., "Radiation chemistry of polymeric systems". Interscience, London, (1962).
- Davies R.W., Worthinton G.S. "Use of scrap Tyre as a Fuel in the Cement Manufacturing Process". In *Recycling and Use of Tyres*, Dhir R.K. et al., eds., Thomas Telford, London (2001).
- Dhir R.K., Limbachiya M.C., Paine K.A., eds., "Recycling and Use of Tyres". Thomas Telford, London (2001).
- El-Dieb A.S., Abdel-Wahab M.M., Abdel-Hameed M.E. "Concrete Using Tire Rubber Particles as Aggregate". In *Recycling and Use of Tyres*, Dhir R.K. et al., eds., Thomas Telford, London (2001).
- Eldin N.N., Senouci A.B., "Tire Rubber Particles as Concrete Aggregate". *Journal of Materials in Civil Engineering* 5(4) (1993) 478-498.
- Galindo Gil. E. "Efecto de la radiación gamma en concreto elaborado con arena sílice, resina poliéster y fibras de polipropileno". Tesis de Licenciatura IQ. UAEM. Toluca, México (2007).
- Greenpeace International. <http://www.greenpeace.org/international>. (Consulta: Marzo 2011).
- Kosmatka S. "Diseño y Control de Mezclas de Concreto". IMCYC, México, (1992).
- Martínez-Barrera G., Giraldo L.F., López B.L., Brostow W. "Effect of gamma radiation on fiber-reinforced polymer concrete". *Polym. Compos.* 29 (2008) 1245-1251.
- Martínez-Barrera G. "Uso de fibras poliméricas en el mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto". *Tópicos en Materiales*. UAEM. México. pp.125-169. (2009).

- Martínez-Barrera G., Brostow W. "Fiber-reinforced polymer concrete: Property improvement by gamma irradiation". In Gamma radiation effects on polymeric materials and its applications. Research Signpost. Kerala India. pp. 27-44. (2009).
- Martínez-Barrera G., Viguera-Santiago E. Hernández-López S., Menchaca-Campos C., Brostow W. "Mechanical improvement of concrete by irradiated polypropylene fibers". *Polym. Eng. Sci.* 21 (2005) 1426-1431.
- Martínez M.E., Benavides C., Carrasco H., "Efecto de la radiación ionizante en polímeros". Contribuciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la Ciencia y la Tecnología en México. Edición conmemorativa 2010 Cap. 27.
- Morton M. "Introduction to Rubber Technology" Van Nostrand Reinhold Company. 7^a edición. N.Y.(1969).
- Navarro F.J., Partal P., Martínez-Boza F., Gallegos. "Influence of Crumb Rubber Concentration on the Rheological Behavior of Crumb Rubber Modified Bitumen". *Energy and Fuels* 19 (2005) 1984-1990.
- Nelson R.G., Hossain A.S.M.M. "An Energetic and Economic Analysis of Using Scrap Tyres for Electricity Generation and Cement Manufacturing". In Recycling and Use of Tyres, Dhir R.K. et al., eds., Thomas Telford, London (2001).
- Neville A.M., Brooks J.J., "Tecnología del Concreto" ed. Trillas, México, (1998).
- Porter R.C. "The economics of waste". Resources for the Future. (2002).
- Povoló F., Hermida E.B., Gómez A. "Tracción de películas de polipropileno-etileno (PEP) irradiado en un reactor experimental. Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, Agosto de 2000, 995-1000.
- Reichmanis E.F., O'Donnell H.J., Hill T.J.D. "Radiation Effects on Polymeric Materials: A brief overview". Irradiation of Polymeric Materials. ACS Symposium Series. (1993).

- Skoog D.A., Holler J., Crouch S. "Principios de análisis instrumental". Cengage Learning. 6ª ed. México. (2008).
- Skoog, Leary. "Análisis Instrumental". MacGraw Hill. 4ª ed. México. (2000).
- Taha M.R., El-Dieb A.S., Nehdi M. "Recycling Tire Rubber in Cement-Based Material" Concrete With Recycled Materials, ACI Committee 555, Report under review. (2008)
- Voda'k F., Trtík K.V., Sopko O., Kapickova P. "Effect of γ -irradiation on strength of concrete for nuclear-safety structures". *Cement and Concrete Research*. 35 (2005) 1447–1451.
- US Environmental Protection Agency, *Emisiones al Aire de la Combustión de Llantas Usadas*, EPA-600/R-97-115; U.S.-México Centro de Información sobre Contaminación del Aire / CICA, Octubre 1997.
- Wikipedia. <http://es.wikipedia.org/wiki/> (consulta: agosto 2011).
- Yang J., Kaliaguine S., Roy C. "Improved quantitative determination of elastomers in tire rubber by kinetic simulation of DTG curves". *Rubber Chemistry and Technology*. 66 (1993) 213-229.

ANEXO I. DISEÑO DE MEZCLAS

Pruebas a los agregados

A continuación se presenta la tabla donde se resumen los resultados de las pruebas aplicadas a los agregados finos y gruesos.

Tabla 1. Resultados de pruebas a los agregados.

MATERIAL	Pesss (kg/dm3)	Abs (%)	H(%)	PVS (kg/m3)	PVC (kg/m3)		
GRAVA	2.350	3.70%	1.36%	1367	1443	TN=	40 mm
ARENA	2.120	12.00%	0.11%	1201	1278	MF=	3.7

Diseño de mezcla

A continuación se presentan las tablas con las que se calculó la mezcla de prueba y rendimientos para llegar a la dosificación de campo con la que se fabricaron las mezclas.

Tabla 2. Mezcla de prueba y rendimientos.

DATOS												
MATERIAL	Pesss (kg/dm3)	Abs (%)	H(%)	PVS (kg/m3)	PVC (kg/m3)							
GRAVA	2.350	3.70%	1.36%	1367	1443	TN=	40mm					
ARENA	2.120	12.00%	0.11%	1201	1278	MF=	3.7					
CEMENTO	3.10	Rev=	10cm	F=	250.0 Kg/cm2	Vol=	66 dm3					
RENDIMIENTOS												
	Pvc real=	2,044.70		% Aire =	2.6%	r Real=	11.5 cm					
	P'h(kg)	F=Pvc real/Pc	Ph (kg)	H (%/100)	Ps (kg)	A (%/100)	Psss (kg)	Pesss (kg/dm3)	Volumen	correccion	Psss (kg)	v(dm3)
cemento	22.6531	14.8812	337.1042		337.1042		337.1042	3.1000	108.7433		337.1042	108.7433
grava	51.6681	14.8812	768.8808	0.0136	758.5644	0.0870	786.6812	2.3500	334.7367	-0.8306	785.8006	334.7367
arena	44.5804	14.8812	663.4077	0.0011	662.6787	0.1200	742.2002	2.1200	350.0944	-0.8306	741.3696	350.0944
agua	18.5004	14.8812	275.3073		286.3527		178.7643	1.0000	178.7643	1.6600	180.4243	180.4243
aire									26.0000			26.0000
I=	137.4020		2044.70		2044.70		2,044.70		998.34		2,044.70	1,000.00
	Pesss real grava=	2.35 Kg/dm3	Abs real =	3.59%	RetA/C real=	0.54						
	Pesss real arena=	2.12 Kg/dm3	Abs real =	11.87%								
			agua total						agua útil			
	768.8808	663.4077	10.3165	275.3073		786.6812	742.2002	28.0669	286.3527			
	758.5644	662.6787	0.7289	11.0454		758.5644	662.6787	79.5214	107.5883			
	10.3165	0.7289	11.0454	286.3527		28.0669	79.5214	107.5883	178.7643			

Fabricación de mezclas

Las siguientes tablas muestran las dosificaciones utilizadas para la fabricación de todas las mezclas.

Tabla 3. Dosificación para los testigos.

MATERIAL	Psss (kg)	PE	v(dm3)	abs	PS	hum	Ph	factor	Ph´
cemento	337.10	3.1	108.74		337.10		337.10	0.1483	50.00
grava	785.80	2.35	334.74	0.0359	758.56	0.0000	758.56	0.1483	112.51
arena	741.37	2.12	350.09	0.1187	662.68	0.0562	699.92	0.1483	103.81
agua	180.42	1	180.42		286.35		249.11	0.1483	36.95
aire	-----		26.00						
Σ=	2044.70		1000.00		2044.70		2044.70		303.27

➤ Material Sin Irradiar

Tabla 4. Dosificación tamaño de partícula 2-3 mm (7 mesh), sustitución 10%

MATERIAL	Psss (kg)	PE	v(dm3)	abs	PS	hum	Ph	factor	Ph´
cemento	108.74	3.1	337.10		337.10		337.10	0.1483	50.00
grava	334.74	2.35	785.80	0.0359	758.56	0.0000	758.56	0.1483	112.51
arena	315.08	2.12	667.23	0.1187	596.41	0.0000	596.41	0.1483	88.46
llanta	35.01	1.035	36.23		36.23		36.23	0.1483	5.37
agua	180.42	1	180.42		278.48		278.48	0.1483	41.31
aire	26.00								
Σ=	1000.00		2006.80		2006.80		2006.80		297.65

Tabla 5. Dosificación tamaño de partícula 2-3 mm (7 mesh), sustitución 20%

MATERIAL	Psss (kg)	PE	v(dm3)	abs	PS	hum	Ph	factor	Ph´
cemento	108.74	3.1	337.10		337.10		337.10	0.1483	50.00
grava	334.74	2.35 Kg/dm3	785.80	0.0359	758.56	0.0000	758.56	0.1483	112.51
arena	280.08	2.12 Kg/dm3	593.10	0.1187	530.14	0.0174	539.37	0.1483	80.00
llanta	70.02	1.035	72.47		72.47		72.47	0.1483	10.75
agua	180.42	1	180.42		270.61		261.39	0.1483	38.77
aire	26.00								
Σ=	1000.00		1968.89		1968.89		1968.89		292.03

Tabla 6. Dosificación tamaño de partícula 2-3 mm (7 mesh), sustitución 30%

MATERIAL	Psss (kg)	PE	v(dm ³)	abs	PS	hum	Ph	factor	Ph'
cemento	108.74	3.1	337.10		337.10		337.10	0.1483	50.00
grava	334.74	2.35 Kg/dm ³	785.80	0.0359	758.56	0.0000	758.56	0.1483	112.51
arena	245.07	2.12 Kg/dm ³	518.96	0.1187	463.88	0.0741	498.23	0.1483	73.90
llanta	105.03	1.035	108.70		108.70		108.70	0.1483	16.12
agua	180.42	1	180.42		262.74		228.39	0.1483	33.88
aire	26.00								
Σ=	1000.00		1930.99		1930.99		1930.99		286.41

Tabla 7. Dosificación tamaño de partícula 20 mesh, sustitución 10%

MATERIAL	Psss (kg)	PE	v(dm ³)	abs	PS	hum	Ph	factor	Ph'
cemento	108.74	3.1	337.10		337.10		337.10	0.1483	50.00
grava	334.74	2.35 Kg/dm ³	785.80	0.0359	758.56	0.0000	758.56	0.1483	112.51
arena	315.08	2.12 Kg/dm ³	667.23	0.1187	596.41	0.0183	607.33	0.1483	90.08
llanta	35.01	1.35	47.26		47.26		47.26	0.1483	7.01
agua	180.42	1	180.42		278.48		267.57	0.1483	39.69
aire	26.00								
Σ=	1000.00		2017.82		2017.82		2017.82		299.29

Tabla 8. Dosificación tamaño de partícula 20 mesh, sustitución 20%

MATERIAL	Psss (kg)	PE	v(dm ³)	abs	PS	hum	Ph	factor	Ph'
cemento	108.74	3.1	337.10		337.10		337.10	0.1483	50.00
grava	334.74	2.35 Kg/dm ³	785.80	0.0359	758.56	0.0000	758.56	0.1483	112.51
arena	280.08	2.12 Kg/dm ³	593.10	0.1187	530.14	0.0208	541.17	0.1483	80.27
llanta	70.02	1.35	94.53		94.53		94.53	0.1483	14.02
agua	180.42	1	180.42		270.61		259.59	0.1483	38.50
aire	26.00								
Σ=	1000.00		1990.95		1990.95		1990.95		295.30

Tabla 9. Dosificación tamaño de partícula 20 mesh, sustitución 30%

MATERIAL	Psss (kg)	PE	v(dm ³)	abs	PS	hum	Ph	factor	Ph'
cemento	108.74	3.1	337.10		337.10		337.10	0.1483	50.00
grava	334.74	2.35 Kg/dm ³	785.80	0.0359	758.56	0.0000	758.56	0.1483	112.51
arena	245.07	2.12 Kg/dm ³	518.96	0.1187	463.88	0.0303	477.93	0.1483	70.89
llanta	105.03	1.35	141.79		141.79		141.79	0.1483	21.03
agua	180.42	1	180.42		262.74		248.69	0.1483	36.89
aire	26.00	1.35							
Σ=	1000.00		1964.08		1964.08		1964.08		291.32

➤ Material Irradiado

Tabla 10. Dosificación tamaño de partícula 2-3 mm (7 mesh), sustitución 10%

MATERIAL	Psss (kg)	PE	v(dm3)	abs	PS	hum	Ph	factor	Ph´
cemento	108.74	3.1	337.10		337.10		337.10	0.0742	25.00
grava	334.74	2.35 Kg/dm3	785.80	0.0359	758.56	0.0000	758.56	0.0742	56.26
arena	315.08	2.12 Kg/dm3	667.23	0.1187	596.41	0.0448	623.13	0.0742	46.21
llanta	35.01	1.035	36.23		36.23		36.23	0.0742	2.69
agua	180.42	1	180.42		278.48		251.76	0.0742	18.67
aire	26.00								
$\Sigma=$	1000.00		2006.80		2006.80		2006.80		148.83

Tabla 11. Dosificación tamaño de partícula 2-3 mm (7 mesh), sustitución 20%

MATERIAL	Psss (kg)	PE	v(dm3)	abs	PS	hum	Ph	factor	Ph´
cemento	108.74	3.1	337.10		337.10		337.10	0.0742	25.00
grava	334.74	2.35 Kg/dm3	785.80	0.0359	758.56	0.0000	758.56	0.0742	56.26
arena	280.08	2.12 Kg/dm3	593.10	0.1187	530.14	0.0448	553.89	0.0742	41.08
llanta	70.02	1.035	72.47		72.47		72.47	0.0742	5.37
agua	180.42	1	180.42		270.61		246.86	0.0742	18.31
aire	26.00								
$\Sigma=$	1000.00		1968.89		1968.89		1968.89		146.02

Tabla 12. Dosificación tamaño de partícula 2-3 mm (7 mesh), sustitución 30%

MATERIAL	Psss (kg)	PE	v(dm3)	abs	PS	hum	Ph	factor	Ph´
cemento	108.74	3.1	337.10		337.10		337.10	0.0742	25.00
grava	334.74	2.35 Kg/dm3	785.80	0.0359	758.56	0.0000	758.56	0.0742	56.26
arena	245.07	2.12 Kg/dm3	518.96	0.1187	463.88	0.0448	484.66	0.0742	35.94
llanta	105.03	1.035	108.70		108.70		108.70	0.0742	8.06
agua	180.42	1	180.42		262.74		241.96	0.0742	17.94
aire	26.00								
$\Sigma=$	1000.00		1930.99		1930.99		1930.99		143.20

Tabla 13. Dosificación tamaño de partícula 20 mesh, sustitución 10%

MATERIAL	Psss (kg)	PE	v(dm3)	abs	PS	hum	Ph	factor	Ph'
cemento	108.74	3.1	337.10		337.10		337.10	0.0742	25.00
grava	334.74	2.35 Kg/dm3	785.80	0.0359	758.56	0.0000	758.56	0.0742	56.26
arena	315.08	2.12 Kg/dm3	667.23	0.1187	596.41	0.0400	620.27	0.0742	46.00
llanta	35.01	1.35	47.26		47.26		47.26	0.0742	3.51
agua	180.42	1	180.42		278.48		254.63	0.0742	18.88
aire	26.00								
Σ=	1000.00		2017.82		2017.82		2017.82		149.64

Tabla 14. Dosificación tamaño de partícula 20 mesh, sustitución 20%

MATERIAL	Psss (kg)	PE	v(dm3)	abs	PS	hum	Ph	factor	Ph'
cemento	108.74	3.1	337.10		337.10		337.10	0.0742	25.00
grava	334.74	2.35 Kg/dm3	785.80	0.0359	758.56	0.0000	758.56	0.0742	56.26
arena	280.08	2.12 Kg/dm3	593.10	0.1187	530.14	0.0400	551.35	0.0742	40.89
llanta	70.02	1.35	94.53		94.53		94.53	0.0742	7.01
agua	180.42	1	180.42		270.61		249.41	0.0742	18.50
aire	26.00								
Σ=	1000.00		1990.95		1990.95		1990.95		147.65

Tabla 15. Dosificación tamaño de partícula 20 mesh, sustitución 30%

MATERIAL	Psss (kg)	PE	v(dm3)	abs	PS	hum	Ph	factor	Ph'
cemento	108.74	3.1	337.10		337.10		337.10	0.0742	25.00
grava	334.74	2.35 Kg/dm3	785.80	0.0359	758.56	0.0000	758.56	0.0742	56.26
arena	245.07	2.12 Kg/dm3	518.96	0.1187	463.88	0.0400	482.43	0.0742	35.78
llanta	105.03	1.35	141.79		141.79		141.79	0.0742	10.52
agua	180.42	1	180.42		262.74		244.19	0.0742	18.11
aire	26.00	1.35							
Σ=	1000.00		1964.08		1964.08		1964.08		145.66

Las siguientes tablas muestran en resumen el control de todas las mezclas elaboradas.

Tabla 16. Material sin irradiar.

CONTROL DE ELABORACION DE MEZCLAS					
AGREGADO DE 2-3 mm					
ESPECIMEN	MEZCLA	FECHA DE FABRICACION	CURADO A 28 DIAS	# ESPECIMENES	CLAVE
TESTIGOS 0%	M1	sábado, 02 de marzo de 2013	sábado, 30 de marzo de 2013	20 CIL + 2 VIGAS	020313-0%-M1
	M2	sábado, 02 de marzo de 2013	sábado, 30 de marzo de 2013	20 CIL + 2 VIGAS	020313-0%-M2
10%	M3	jueves, 07 de marzo de 2013	jueves, 04 de abril de 2013	20 CIL + 2 VIGAS	070313-10%-M3
	M4	jueves, 07 de marzo de 2013	jueves, 04 de abril de 2013	20 CIL + 2 VIGAS	070313-10%-M4
20%	M5	sábado, 09 de marzo de 2013	sábado, 06 de abril de 2013	20 CIL + 2 VIGAS	090313-20%-M5
	M6	sábado, 09 de marzo de 2013	sábado, 06 de abril de 2013	20 CIL + 2 VIGAS	090313-20%-M6
30%	M7	jueves, 14 de marzo de 2013	jueves, 11 de abril de 2013	20 CIL + 2 VIGAS	140313-30%-M7
	M8	jueves, 14 de marzo de 2013	jueves, 11 de abril de 2013	20 CIL + 2 VIGAS	140313-30%-M8
AGREGADO DE 20 MESH					
ESPECIMEN	MEZCLA	FECHA DE FABRICACION	CURADO A 28 DIAS	# ESPECIMENES	CLAVE
10%	M9	sábado, 23 de marzo de 2013	sábado, 20 de abril de 2013	20 CIL + 2 VIGAS	230313-10%P-M9
	M10	sábado, 23 de marzo de 2013	sábado, 20 de abril de 2013	20 CIL + 2 VIGAS	230313-10%P-M10
20%	M11	sábado, 06 de abril de 2013	sábado, 04 de mayo de 2013	20 CIL + 2 VIGAS	060413-20%P-M11
	M12	sábado, 06 de abril de 2013	sábado, 04 de mayo de 2013	20 CIL + 2 VIGAS	060413-20%P-M12
30%	M13	jueves, 11 de abril de 2013	jueves, 09 de mayo de 2013	20 CIL + 2 VIGAS	110413-30%P-M13
	M14	jueves, 11 de abril de 2013	jueves, 09 de mayo de 2013	20 CIL + 2 VIGAS	110413-30%P-M14

Tabla 17. Material Irradiado.

CONTROL DE ELABORACION DE MEZCLAS					
AGREGADO DE 2-3 mm IRRADIADO A 200 Kgs					
ESPECIMEN	MEZCLA	FECHA DE FABRICACION	CURADO A 28 DIAS	# ESPECIMENES	CLAVE
10%	M1	jueves, 30 de mayo de 2013	jueves, 27 de junio de 2013	10 CIL + 1 VIGA	300513-10%-I-M1
20%	M2	jueves, 30 de mayo de 2013	jueves, 27 de junio de 2013	9 CIL + 1 VIGA	300513-20%-I-M2
30%	M3	jueves, 30 de mayo de 2013	jueves, 27 de junio de 2013	9 CIL + 1 VIGA	300513-30%-I-M3
AGREGADO DE 20 MESH IRRADIADO A 200 Kgs					
ESPECIMEN	MEZCLA	FECHA DE FABRICACION	CURADO A 28 DIAS	# ESPECIMENES	CLAVE
10%	M4	martes, 11 de junio de 2013	martes, 09 de julio de 2013	9 CIL + 1 VIGA	110613-10%-P-I-M4
20%	M5	martes, 11 de junio de 2013	martes, 09 de julio de 2013	10 CIL + 1 VIGA	110613-20%-P-I-M5
30%	M6	martes, 11 de junio de 2013	martes, 09 de julio de 2013	10 CIL + 1 VIGA	110613-30%-P-I-M6

ANEXO 2. PRUEBAS MECÁNICAS DE CONCRETO.

Pruebas a Compresión

Control de pesos y dimensiones de los especímenes

Tabla 18. Resumen del control de pesos y dimensiones, material sin irradiar.

CONTROL DE PESO Y DIMENSIONES DE LOS ESPECIMENES DESPUES DE 28 DIAS, MATERIAL SIN IRRADIAR												
MEZCLA	CLAVE DEL CILINDRO	DIAMETRO [mm]				ALTURA -LONGITUD [mm]				PESO [kg]	Area (cm ²)	
		D ₁	D ₂	D ₃	D _{PROM}	h ₁	h ₂	h ₃	h _{PROM}	w	A=πD ² /4	
M-1	CILINDRO 1	151.28	150.80	149.54	150.54	309.00	321.00	310.00	313.33	10.84	177.989	
	CILINDRO 2	148.14	151.00	150.50	149.88	308.00	306.00	309.00	307.67	10.86	176.432	
	CILINDRO 3	150.40	149.00	150.90	150.10	333.00	323.00	323.00	326.33	10.78	176.950	
	CILINDRO 4	150.20	149.72	149.02	149.65	318.80	323.60	305.00	315.80	10.82	175.883	
	CILINDRO 5	149.40	149.60	153.00	150.67	324.00	306.80	300.00	310.27	10.80	178.289	
	CILINDRO 6	148.40	149.70	159.00	152.37	293.20	295.20	290.20	292.87	10.76	182.335	
M-3	CILINDRO 1	149.00	148.99	150.50	149.50	313.80	304.00	298.20	305.33	10.62	175.531	
	CILINDRO 2	151.00	150.20	150.84	150.68	314.00	317.00	314.80	315.27	10.66	178.320	
	CILINDRO 3	150.40	149.00	149.52	149.64	327.00	325.60	333.00	328.53	10.68	175.867	
	CILINDRO 4	149.70	150.26	149.62	149.86	305.00	324.80	310.00	313.27	10.68	176.385	
	CILINDRO 5	147.00	151.28	150.00	149.43	299.60	290.00	299.32	296.31	10.34	175.366	
	CILINDRO 6	147.30	151.00	159.00	152.43	290.62	299.82	309.00	299.81	10.64	182.494	
M-5	CILINDRO 1	150.40	150.82	149.82	150.35	290.00	281.20	279.20	283.47	10.12	177.532	
	CILINDRO 2	150.70	151.48	151.18	151.12	310.00	300.80	312.00	307.60	9.98	179.363	
	CILINDRO 3	150.70	149.22	150.80	150.24	284.90	330.00	325.60	313.50	10.24	177.281	
	CILINDRO 4	148.94	148.29	149.10	148.78	273.60	280.00	293.20	282.27	10.02	173.844	
	CILINDRO 5	150.70	148.20	150.00	149.63	302.86	327.60	327.60	319.35	10.40	175.852	
	CILINDRO 6	147.56	150.70	147.00	148.42	329.72	317.80	320.00	322.51	10.25	173.011	
M-7	CILINDRO 1	149.70	150.00	149.72	149.81	308.80	305.00	314.80	309.53	10.14	176.259	
	CILINDRO 2	149.50	151.68	148.44	149.87	304.00	297.00	313.80	304.93	10.08	176.416	
	CILINDRO 3	151.14	149.60	149.68	150.14	308.00	314.00	320.00	314.00	10.30	177.045	
	CILINDRO 4	150.00	149.22	149.72	149.65	303.00	291.40	296.20	296.87	10.10	175.883	
	CILINDRO 5	155.20	151.00	156.00	154.07	296.20	322.00	301.00	306.40	10.09	186.426	
	CILINDRO 6	149.60	149.60	147.20	148.80	307.00	296.20	302.00	301.73	9.93	173.898	
M-9	CILINDRO 1	151.92	150.60	151.36	151.29	300.78	302.62	304.00	302.47	10.32	179.775	
	CILINDRO 2	150.80	150.20	149.52	150.17	301.22	302.85	300.56	301.54	10.34	177.123	
	CILINDRO 3	147.56	152.06	150.64	150.09	302.56	302.34	302.06	302.32	10.32	176.919	
	CILINDRO 4	151.88	148.08	151.48	150.48	302.00	302.10	302.28	302.13	10.42	177.847	
	CILINDRO 5	149.20	151.40	149.50	150.03	291.40	295.20	315.80	300.80	10.41	176.793	
	CILINDRO 6	150.00	149.60	151.00	150.20	318.20	328.00	322.00	322.73	10.43	177.186	
M-11	CILINDRO 1	149.82	150.86	150.00	150.23	298.00	299.92	298.28	298.73	9.98	177.249	
	CILINDRO 2	151.22	148.92	151.48	150.54	300.56	301.84	300.10	300.83	9.98	177.989	
	CILINDRO 3	151.00	150.22	148.92	150.05	302.16	302.44	303.00	302.53	10.06	176.825	
	CILINDRO 4	150.68	148.16	152.48	150.44	303.00	300.32	301.26	301.53	10.02	177.753	
	CILINDRO 5	151.70	151.80	149.82	151.11	300.00	300.00	300.00	300.00	9.98	179.332	
	CILINDRO 6	148.70	151.30	149.40	149.80	298.00	299.00	303.00	300.00	10.06	176.244	
M-13	CILINDRO 1	147.66	151.28	150.30	149.75	301.30	300.44	301.82	301.19	9.58	176.118	
	CILINDRO 2	150.18	150.58	149.52	150.09	300.10	297.86	299.42	299.13	9.52	176.935	
	CILINDRO 3	148.82	152.16	150.08	150.35	300.72	298.62	299.52	299.62	9.54	177.548	
	CILINDRO 4	150.94	147.02	153.74	150.57	298.64	300.72	300.64	300.00	9.66	178.052	
	CILINDRO 5	151.40	149.40	150.00	150.27	323.60	310.00	327.60	320.40	9.64	177.343	
	CILINDRO 6	149.50	151.00	150.60	150.37	323.60	326.60	315.00	321.73	9.71	177.580	

Tabla 19. Resumen del control de pesos y dimensiones, material irradiado.

CONTROL DE PESO Y DIMENSIONES DE LOS ESPECIMENES DESPUES DE 28 DIAS, ELABORADOS CON MATERIAL IRRADIADO											
MEZCLA	CLAVE DEL CILINDRO	DIAMETRO [mm]				ALTURA -LONGITUD [mm]				PESO [kg]	Area (cm ²)
		D ₁	D ₂	D ₃	D _{PROM}	h ₁	h ₂	h ₃	h _{PROM}	w	A=πD ² /4
M-1-Irr	CILINDRO 5	148.64	151.00	148.80	149.48	300.30	299.80	299.82	299.97	10.40	175.491
	CILINDRO 6	150.80	148.84	149.32	149.65	302.36	302.90	300.90	302.05	10.44	175.899
	CILINDRO 7	151.18	150.90	150.00	150.69	301.80	302.00	303.64	302.48	10.66	178.352
	CILINDRO 8	147.16	148.00	147.26	147.47	299.32	298.50	299.12	298.98	10.38	170.811
	CILINDRO 9	150.80	148.10	148.84	149.25	300.30	301.38	300.98	300.89	10.48	174.944
	CILINDRO 10	149.00	150.80	148.84	149.55	299.12	299.32	299.42	299.29	10.32	175.648
M-2-I	CILINDRO 1	149.36	148.90	149.86	149.37	298.42	298.32	300.00	298.91	10.32	175.241
	CILINDRO 2	150.20	150.40	149.78	150.13	300.40	300.82	300.78	300.67	10.06	177.013
	CILINDRO 3	150.00	150.56	150.60	150.39	303.32	303.90	303.32	303.51	10.66	177.627
	CILINDRO 5	152.90	151.00	152.94	152.28	306.00	306.42	306.12	306.18	10.46	182.128
	CILINDRO 7	149.42	149.90	149.72	149.68	303.64	302.44	301.68	302.59	10.82	175.961
M-3-I	CILINDRO 3	151.10	150.60	149.69	150.46	301.18	299.42	301.00	300.53	10.32	177.808
	CILINDRO 4	151.00	150.90	149.10	150.33	299.40	300.40	300.00	299.93	10.52	177.501
	CILINDRO 5	151.00	149.50	149.02	149.84	301.00	300.00	300.00	300.33	10.28	176.338
	CILINDRO 6	150.70	150.20	150.50	150.47	301.30	300.60	300.80	300.90	10.48	177.816
	CILINDRO 7	150.80	150.90	149.02	150.24	299.32	299.94	299.40	299.55	10.16	177.281
	CILINDRO 8	148.64	149.12	150.40	149.39	299.42	301.80	300.20	300.47	10.10	175.272
M-4-I	CILINDRO 1	150.10	150.10	148.02	149.41	298.30	299.50	299.78	299.19	10.78	175.319
	CILINDRO 2	150.40	149.58	149.29	149.76	304.00	305.00	303.80	304.27	10.96	176.142
	CILINDRO 3	150.70	151.00	150.80	150.83	301.12	301.80	302.40	301.77	10.96	178.684
	CILINDRO 4	149.20	151.00	150.60	150.27	299.70	301.88	301.40	300.99	10.79	177.343
	CILINDRO 5	149.92	149.32	149.22	149.49	300.76	299.90	300.50	300.39	10.79	175.507
	CILINDRO 6	150.82	148.98	150.70	150.17	300.00	298.70	299.40	299.37	10.77	177.108
M-5-I	CILINDRO 1	150.40	148.50	150.20	149.70	302.70	303.20	302.30	302.73	10.95	176.008
	CILINDRO 2	149.70	150.20	148.90	149.60	304.52	304.20	301.00	303.24	10.97	175.773
	CILINDRO 3	149.30	150.00	149.80	149.70	301.10	301.90	301.80	301.60	10.85	176.008
	CILINDRO 4	148.40	150.00	149.40	149.27	302.76	302.00	302.30	302.35	10.96	174.991
	CILINDRO 5	150.80	148.90	149.80	149.83	301.20	302.80	301.10	301.70	10.99	176.322
	CILINDRO 6	148.14	149.80	150.40	149.45	300.00	302.80	301.00	301.27	10.98	175.413
M-6-I	CILINDRO 1	149.70	149.82	149.84	149.79	302.56	301.40	302.00	301.99	10.79	176.212
	CILINDRO 2	150.40	148.50	150.40	149.77	305.00	302.00	304.00	303.67	10.30	176.165
	CILINDRO 3	149.92	149.32	149.22	149.49	300.80	300.00	298.90	299.90	10.39	175.507
	CILINDRO 4	150.10	148.24	150.40	149.58	299.90	300.00	299.98	299.96	10.41	175.726
	CILINDRO 5	151.20	149.62	149.82	150.21	302.30	302.00	301.20	301.83	10.24	177.218
	CILINDRO 6	150.00	148.79	150.40	149.73	298.10	299.20	300.00	299.10	10.43	176.079

Resultados de la prueba a compresión

Tabla 20. Resultados de la prueba a compresión, material sin irradiar.

DATOS Y RESULTADOS PRUEBAS A COMPRESIÓN A 28 DIAS TOMADOS EL DÍA DE LAS PRUEBAS								
Mezcla	Cilindro	Diámetro D (cm)	Area (cm ²) $A=\pi D^2/4$	Carga P (kg) Manómetro	Resistencia a Comp $f'c$ (kg/cm ²)	Tipo de prueba	Tipo de curado	Día de la Prueba
M-1	CIL 3	15.010	176.950	41966.00	237	COMPRESION	CTO. DE CURADO	30/04/2013
	CIL 4	14.965	175.883	45100.00	256	COMPRESION	CTO. DE CURADO	30/04/2013
M-3	CIL 3	14.964	175.867	36997.00	210	COMPRESION	CTO. DE CURADO	30/04/2013
	CIL 4	14.986	176.385	40162.00	228	COMPRESION	CTO. DE CURADO	30/04/2013
M-5	CIL 3	15.024	177.281	22327.00	126	COMPRESION	CTO. DE CURADO	30/04/2013
	CIL 4	14.878	173.844	24323.00	140	COMPRESION	CTO. DE CURADO	30/04/2013
M-7	CIL 3	15.014	177.045	26895.00	152	COMPRESION	CTO. DE CURADO	30/04/2013
	CIL 4	14.965	175.883	21950.00	125	COMPRESION	CTO. DE CURADO	30/04/2013
M-9	CIL 3	15.009	176.919	29220.00	165	COMPRESION	CTO. DE CURADO	30/04/2013
	CIL 4	15.048	177.847	29521.00	166	COMPRESION	CTO. DE CURADO	30/04/2013
M-11	CIL 3	15.005	176.825	21651.00	122	COMPRESION	CTO. DE CURADO	30/04/2013
	CIL 4	15.044	177.753	22692.00	128	COMPRESION	CTO. DE CURADO	30/04/2013
M-13	CIL 3	15.035	177.548	7691.00	43	COMPRESION	CTO. DE CURADO	30/04/2013
	CIL 4	15.057	178.052	11390.00	64	COMPRESION	CTO. DE CURADO	30/04/2013

Tabla 21. Resultados de la prueba a compresión, material irradiado.

DATOS Y RESULTADOS PRUEBAS A COMPRESIÓN A 28 DIAS TOMADOS EL DÍA DE LAS PRUEBAS								
Mezcla	Cilindro	Diámetro D (cm)	Area (cm ²) $A=\pi D^2/4$	Carga P (kg) Manómetro	Resistencia a Comp $f'c=P/A$ (kg/cm ²)	Tipo de prueba	Tipo de curado	Día de la Prueba
M-1-1	CIL 7	15.069	178.352	31295.58	175	COMPRESION	CTO. DE CURADO	09/07/2013
	CIL 8	14.747	170.811	31091.70	182	COMPRESION	CTO. DE CURADO	09/07/2013
M-2-1	CIL 2	15.013	177.013	29542.21	167	COMPRESION	CTO. DE CURADO	09/07/2013
	CIL 5	15.228	182.128	28237.38	155	COMPRESION	CTO. DE CURADO	09/07/2013
M-3-1	CIL 3	15.046	177.808	27442.25	154	COMPRESION	CTO. DE CURADO	09/07/2013
	CIL 4	15.033	177.501	26453.43	149	COMPRESION	CTO. DE CURADO	09/07/2013
M-4-1	CIL 1	14.941	175.319	29990.75	171	COMPRESION	CTO. DE CURADO	09/07/2013
	CIL 2	14.976	176.142	26759.25	152	COMPRESION	CTO. DE CURADO	09/07/2013
M-5-1	CIL 1	14.970	176.008	19103.56	109	COMPRESION	CTO. DE CURADO	09/07/2013
	CIL 2	14.960	175.773	17095.34	97	COMPRESION	CTO. DE CURADO	09/07/2013
M-6-1	CIL 1	14.979	176.212	13466.27	76	COMPRESION	CTO. DE CURADO	09/07/2013
	CIL 2	14.977	176.165	13394.92	76	COMPRESION	CTO. DE CURADO	09/07/2013

Determinación del Módulo de Elasticidad Estático

Pruebas de carga vs. deformación

Las siguientes tablas muestran los datos y resultados obtenidos de las pruebas de carga-deformación realizadas a todas las mezclas así como los cálculos para obtener la gráfica esfuerzo-deformación unitaria de cada mezcla.

PRUEBAS DE CARGA VS. DEFORMACION PARA MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO

ESPECIMENES SIN IRRADIAR

LA DEFORMACION ESTA EN MICRAS [μm]

Carga P (ton)	MEZCLA M-1					
	Cilindro 1			Cilindro 2		
	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu\text{m})$	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu\text{m})$
1	11	6	8.5	1	16	8.5
2	15	6	10.5	3	25	14.0
3	19	13	16.0	7	34	20.5
4	23	21	22.0	10	41	25.5
5	27	28	27.5	15	50	32.5
10	50	66	58.0	38	84	61.0
15	72	97	84.5	67	125	96.0
20	105	146	125.5	111	164	137.5

Cilindro 1						Cilindro 2					
P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$	P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$
1	0.00000850	177.989	5.61831772	0.12	0.0000708	1	0.00000850	176.432	5.66790745	0.12	0.0000708333
2	0.00001050	177.989	11.2366354	0.12	0.0000875	2	0.00001400	176.432	11.3358149	0.12	0.0001166667
3	0.00001600	177.989	16.8549532	0.12	0.0001333	3	0.00002050	176.432	17.0037223	0.12	0.0001708333
4	0.00002200	177.989	22.4732709	0.12	0.0001833	4	0.00002550	176.432	22.6716298	0.12	0.0002125000
5	0.00002750	177.989	28.0915886	0.12	0.0002292	5	0.00003250	176.432	28.3395372	0.12	0.0002708333
10	0.00005800	177.989	56.1831772	0.12	0.0004833	10	0.00006100	176.432	56.6790745	0.12	0.0005083333
15	0.00008450	177.989	84.2747658	0.12	0.0007042	15	0.00009600	176.432	85.0186117	0.12	0.0008000000
20	0.00012550	177.989	112.366354	0.12	0.0010458	20	0.00013750	176.432	113.358149	0.12	0.0011458333

MEZCLA M-3					
Cilindro 1			Cilindro 2		
δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$
5	26	15.5	5	27	16.0
10	35	22.5	9	37	23.0
15	44	29.5	14	44	29.0
20	50	35.0	19	52	35.5
26	60	43.0	24	60	42.0
57	96	76.5	51	100	75.5
92	137	114.5	82	145	113.5
110	157	133.5	96	165	130.5

Cilindro 1						Cilindro 2					
P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$	P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$
1	0.00001550	175.531	5.69701155	0.12	0.0001291667	1	0.00001600	178.320	5.60788237	0.12	0.0001333333
2	0.00002250	175.531	11.3940231	0.12	0.0001875000	2	0.00002300	178.320	11.2157647	0.12	0.0001916667
3	0.00002950	175.531	17.0910347	0.12	0.0002458333	3	0.00002900	178.320	16.8236471	0.12	0.0002416667
4	0.00003500	175.531	22.7880462	0.12	0.0002916667	4	0.00003550	178.320	22.4315295	0.12	0.0002958333
5	0.00004300	175.531	28.4850578	0.12	0.0003583333	5	0.00004200	178.320	28.0394119	0.12	0.0003500000
10	0.00007650	175.531	56.9701155	0.12	0.0006375000	10	0.00007550	178.320	56.0788237	0.12	0.0006291667
15	0.00011450	175.531	85.4551733	0.12	0.0009541667	15	0.00011350	178.320	84.1182356	0.12	0.0009458333
17	0.00013350	175.531	96.8491964	0.12	0.0011125000	17	0.00013050	178.320	95.3340003	0.12	0.0010875000

Carga P (ton)	MEZCLA M-5					
	Cilindro 1			Cilindro 2		
	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$
1	0	17	8.5	14	0	7.0
2	0	31	15.5	30	0	15.0
3	1	44	22.5	43	8	25.5
4	3	57	30.0	55	6	30.5
5	7	69	38.0	67	12	39.5
6	13	80	46.5	77	18	47.5
8	24	103	63.5	100	31	65.5
10	39	124	81.5	120	45	82.5

Cilindro 1						Cilindro 2					
P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$	P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$
1	0.00000850	177.532	5.63277639	0.12	0.0000708333	1	0.00000700	179.363	5.57527417	0.12	0.0000583333
2	0.00001550	177.532	11.2655528	0.12	0.0001291667	2	0.00001500	179.363	11.1505483	0.12	0.0001250000
3	0.00002250	177.532	16.8983292	0.12	0.0001875000	3	0.00002550	179.363	16.7258225	0.12	0.0002125000
4	0.00003000	177.532	22.5311056	0.12	0.0002500000	4	0.00003050	179.363	22.3010967	0.12	0.0002541667
5	0.00003800	177.532	28.163882	0.12	0.0003166667	5	0.00003950	179.363	27.8763708	0.12	0.0003291667
6	0.00004650	177.532	33.7966583	0.12	0.0003875000	6	0.00004750	179.363	33.451645	0.12	0.0003958333
8	0.00006350	177.532	45.0622111	0.12	0.0005291667	8	0.00006550	179.363	44.6021933	0.12	0.0005458333
10	0.00008150	177.532	56.3277639	0.12	0.0006791667	10	0.00008250	179.363	55.7527417	0.12	0.0006875000

Carga P (ton)	MEZCLA M-7					
	Cilindro 1			Cilindro 2		
	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$
1	0	14	7.0	11	3	7.0
2	0	29	14.5	19	9	14.0
3	0	44	22.0	28	14	21.0
4	0	61	30.5	37	20	28.5
5	2	74	38.0	46	27	36.5
6	7	86	46.5	57	33	45.0
8	19	114	66.5	77	46	61.5
10	32	139	85.5	99	60	79.5

Cilindro 1						Cilindro 2					
P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$	P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$
1	0.00000700	176.259	5.67345791	0.12	0.0000583333	1	0.00000700	176.416	5.6684117	0.12	0.0000583333
2	0.00001450	176.259	11.3469158	0.12	0.0001208333	2	0.00001400	176.416	11.3368234	0.12	0.0001166667
3	0.00002200	176.259	17.0203737	0.12	0.0001833333	3	0.00002100	176.416	17.0052351	0.12	0.0001750000
4	0.00003050	176.259	22.6938316	0.12	0.0002541667	4	0.00002850	176.416	22.6736468	0.12	0.0002375000
5	0.00003800	176.259	28.3672895	0.12	0.0003166667	5	0.00003650	176.416	28.3420585	0.12	0.0003041667
6	0.00004650	176.259	34.0407475	0.12	0.0003875000	6	0.00004500	176.416	34.0104702	0.12	0.0003750000
8	0.00006650	176.259	45.3876633	0.12	0.000541667	8	0.00006150	176.416	45.3472936	0.12	0.0005125000
10	0.00008550	176.259	56.7345791	0.12	0.0007125000	10	0.00007950	176.416	56.684117	0.12	0.0006625000

Carga P (ton)	MEZCLA M-9					
	Cilindro 1			Cilindro 2		
	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$
1	1	19	10.0	12	2	7.0
2	2	30	16.0	24	5	14.5
3	5	43	24.0	35	9	22.0
4	8	55	31.5	47	14	30.5
5	11	67	39.0	58	21	39.5
6	15	77	46.0	66	27	46.5
8	24	105	64.5	86	43	64.5
10	34	129	81.5	107	60	83.5
12	45	155	100.0	128	76	102.0

Cilindro 1						Cilindro 2					
P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$	P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$
1	0.00001000	179.775	5.56250655	0.12	0.0000833333	1	0.00000700	177.123	5.64578684	0.12	0.0000583333
2	0.00001600	179.775	11.1250131	0.12	0.0001333333	2	0.00001450	177.123	11.2915737	0.12	0.0001208333
3	0.00002400	179.775	16.6875197	0.12	0.0002000000	3	0.00002200	177.123	16.9373605	0.12	0.0001833333
4	0.00003150	179.775	22.2500262	0.12	0.0002625000	4	0.00003050	177.123	22.5831474	0.12	0.0002541667
5	0.00003900	179.775	27.8125328	0.12	0.0003250000	5	0.00003950	177.123	28.2289342	0.12	0.0003291667
6	0.00004600	179.775	33.3750393	0.12	0.0003833333	6	0.00004650	177.123	33.874721	0.12	0.0003875000
8	0.00006450	179.775	44.5000524	0.12	0.0005375000	8	0.00006450	177.123	45.1662947	0.12	0.0005375000
10	0.00008150	179.775	55.6250655	0.12	0.0006791667	10	0.00008350	177.123	56.4578684	0.12	0.0006958333
12	0.00010000	179.775	66.7500786	0.12	0.0008333333	12	0.00010200	177.123	67.7494421	0.12	0.0008500000

Carga P (ton)	MEZCLA M-11					
	Cilindro 1			Cilindro 2		
	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$
1	3	19	11.0	4	15	9.5
2	6	33	19.5	9	28	18.5
3	11	48	29.5	15	43	29.0
4	17	63	40.0	20	55	37.5
5	23	76	49.5	27	67	47.0
7	39	106	72.5	41	96	68.5
9	58	137	97.5	58	125	91.5

Cilindro 1						Cilindro 2					
P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$	P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$
1	0.00001100	177.249	5.64177883	0.12	0.0000916667	1	0.00000950	177.989	5.61831772	0.12	0.0000791667
2	0.00001950	177.249	11.2835577	0.12	0.0001625000	2	0.00001850	177.989	11.2366354	0.12	0.0001541667
3	0.00002950	177.249	16.9253365	0.12	0.0002458333	3	0.00002900	177.989	16.8549532	0.12	0.0002416667
4	0.00004000	177.249	22.5671153	0.12	0.0003333333	4	0.00003750	177.989	22.4732709	0.12	0.0003125000
5	0.00004950	177.249	28.2088941	0.12	0.0004125000	5	0.00004700	177.989	28.0915886	0.12	0.0003916667
7	0.00007250	177.249	39.4924518	0.12	0.0006041667	7	0.00006850	177.989	39.328224	0.12	0.0005708333
9	0.00009750	177.249	50.7760095	0.12	0.0008125000	9	0.00009150	177.989	50.5648595	0.12	0.0007625000

Carga P (ton)	MEZCLA M-13					
	Cilindro 1			Cilindro 2		
	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$
0.5	0	14	7.0	6	1	3.5
1	0	27	13.5	12	6	9.0
1.5	0	39	19.5	19	14	16.5
2	0	49	24.5	24	21	22.5
2.5	2	60	31.0	31	29	30.0
3	3	72	37.5	37	36	36.5
3.5	5	82	43.5	44	45	44.5
4	6	92	49.0	49	51	50.0

Cilindro 1						Cilindro 2					
P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$	P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$
0.5	0.00000700	176.118	2.83900263	0.12	0.0000583333	0.5	0.00000350	176.935	2.82590344	0.12	0.0000291667
1	0.00001350	176.118	5.67800527	0.12	0.0001125000	1	0.00000900	176.935	5.65180687	0.12	0.0000750000
1.5	0.00001950	176.118	8.5170079	0.12	0.0001625000	1.5	0.00001650	176.935	8.47771031	0.12	0.0001375000
2	0.00002450	176.118	11.3560105	0.12	0.0002041667	2	0.00002250	176.935	11.3036137	0.12	0.0001875000
2.5	0.00003100	176.118	14.1950132	0.12	0.0002583333	2.5	0.00003000	176.935	14.1295172	0.12	0.0002500000
3	0.00003750	176.118	17.0340158	0.12	0.0003125000	3	0.00003650	176.935	16.9554206	0.12	0.0003041667
3.5	0.00004350	176.118	19.8730184	0.12	0.0003625000	3.5	0.00004450	176.935	19.7813241	0.12	0.0003708333
4	0.00004900	176.118	22.7120211	0.12	0.0004083333	4	0.00005000	176.935	22.6072275	0.12	0.0004166667

PRUEBAS DE CARGA VS. DEFORMACION PARA MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO

ESPECIMENES CON MAT. IRRADIADO (LA DEFORMACION ESTA EN MICRAS [μm])

Carga P (ton)	MEZCLA M-1-I					
	Cilindro 9			Cilindro 10		
	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$
1	2	12	7.0	2	5	3.5
2	4	20	12.0	5	15	10.0
3	6	33	19.5	10	25	17.5
4	7	45	26.0	15	35	25.0
5	10	55	32.5	20	45	32.5
10	25	98	61.5	45	94	69.5
13	37	182	109.5	65	186	125.5

Cilindro 9						Cilindro 10					
P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$	P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$
1	0.00000700	174.944	5.71611343	0.12	0.0000583	1	0.00000350	175.648	5.69320267	0.12	0.0000291667
2	0.00001200	174.944	11.4322269	0.12	0.0001000	2	0.00001000	175.648	11.3864053	0.12	0.0000833333
3	0.00001950	174.944	17.1483403	0.12	0.0001625	3	0.00001750	175.648	17.079608	0.12	0.0001458333
4	0.00002600	174.944	22.8644537	0.12	0.0002167	4	0.00002500	175.648	22.7728107	0.12	0.0002083333
5	0.00003250	174.944	28.5805671	0.12	0.0002708	5	0.00003250	175.648	28.4660133	0.12	0.0002708333
10	0.00006150	174.944	57.1611343	0.12	0.0005125	10	0.00006950	175.648	56.9320267	0.12	0.0005791667
13	0.00010950	174.944	74.3094746	0.12	0.0009125	13	0.00012550	175.648	74.0116347	0.12	0.0010458333

Carga P (ton)	MEZCLA M-2-I					
	Cilindro 7			Cilindro 9		
	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$
1	5	9	7.0	4	9	6.5
2	7	19	13.0	5	20	12.5
3	12	29	20.5	10	30	20.0
4	17	38	27.5	16	41	28.5
5	23	49	36.0	22	50	36.0
10	55	98	76.5	56	101	78.5
12	74	182	128.0	72	183	127.5

Cilindro 7						Cilindro 9					
P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$	P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$
1	0.00000700	175.961	5.6830643	0.12	0.0000583333	1	0.00000650	175.632	5.6937103	0.12	0.0000541667
2	0.00001300	175.961	11.3661286	0.12	0.0001083333	2	0.00001250	175.632	11.3874206	0.12	0.0001041667
3	0.00002050	175.961	17.0491929	0.12	0.0001708333	3	0.00002000	175.632	17.0811309	0.12	0.0001666667
4	0.00002750	175.961	22.7322572	0.12	0.0002291667	4	0.00002850	175.632	22.7748412	0.12	0.0002375000
5	0.00003600	175.961	28.4153215	0.12	0.0003000000	5	0.00003600	175.632	28.4685515	0.12	0.0003000000
10	0.00007650	175.961	56.830643	0.12	0.0006375000	10	0.00007850	175.632	56.937103	0.12	0.0006541667
12	0.00012800	175.961	68.1967716	0.12	0.0010666667	12	0.00012750	175.632	68.3245236	0.12	0.0010625000

Carga P (ton)	MEZCLA M-3-I					
	Cilindro 5			Cilindro 7		
	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$
1	3	10	6.5	2	11	6.5
2	6	16	11.0	2	25	13.5
3	15	23	19.0	6	34	20.0
4	23	31	27.0	10	50	30.0
5	31	40	35.5	13	64	38.5
10	64	91	77.5	34	121	77.5
11	70	104	87.0	39	165	102.0

Cilindro 5						Cilindro 7					
P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$	P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$
1	0.00000650	176.338	5.67093396	0.12	0.0000541667	1	0.00000650	177.281	5.64077749	0.12	0.0000541667
2	0.00001100	176.338	11.3418679	0.12	0.0000916667	2	0.00001350	177.281	11.281555	0.12	0.0001125000
3	0.00001900	176.338	17.0128019	0.12	0.0001583333	3	0.00002000	177.281	16.9223325	0.12	0.0001666667
4	0.00002700	176.338	22.6837358	0.12	0.0002250000	4	0.00003000	177.281	22.56311	0.12	0.0002500000
5	0.00003550	176.338	28.3546698	0.12	0.0002958333	5	0.00003850	177.281	28.2038875	0.12	0.0003208333
10	0.00007750	176.338	56.7093396	0.12	0.0006458333	10	0.00007750	177.281	56.4077749	0.12	0.0006458333
11	0.00008700	176.338	62.3802736	0.12	0.0007250000	11	0.00010200	177.281	62.0485524	0.12	0.0008500000

Carga P (ton)	MEZCLA M-4-I					
	Cilindro 3			Cilindro 4		
	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$
1	4	6	5.0	3	8	5.5
2	9	13	11.0	6	18	12.0
3	15	22	18.5	11	30	20.5
4	22	30	26.0	15	40	27.5
5	30	39	34.5	19	47	33.0
10	68	83	75.5	51	93	72.0
12	87	104	95.5	67	142	104.5

Cilindro 3						Cilindro 4					
P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$	P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$
1	0.00000500	178.684	5.59648651	0.12	0.0000416667	1	0.00000550	177.343	5.63877562	0.12	0.0000458333
2	0.00001100	178.684	11.192973	0.12	0.0000916667	2	0.00001200	177.343	11.2775512	0.12	0.0001000000
3	0.00001850	178.684	16.7894595	0.12	0.0001541667	3	0.00002050	177.343	16.9163269	0.12	0.0001708333
4	0.00002600	178.684	22.385946	0.12	0.0002166667	4	0.00002750	177.343	22.5551025	0.12	0.0002291667
5	0.00003450	178.684	27.9824325	0.12	0.0002875000	5	0.00003300	177.343	28.1938781	0.12	0.0002750000
10	0.00007550	178.684	55.9648651	0.12	0.0006291667	10	0.00007200	177.343	56.3877562	0.12	0.0006000000
12	0.00009550	178.684	67.1578381	0.12	0.0007958333	12	0.00010450	177.343	67.6653074	0.12	0.0008708333

Carga P (ton)	MEZCLA M-5-I					
	Cilindro 3			Cilindro 4		
	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$
1	2	12	7.0	4	7	5.5
2	4	27	15.5	9	19	14.0
3	9	43	26.0	15	32	23.5
4	14	59	36.5	21	46	33.5
5	18	73	45.5	28	59	43.5
6	24	91	57.5	34	74	54.0
7	29	110	69.5	43	89	66.0
8	33	149	91.0	52	106	79.0

Cilindro 3						Cilindro 4					
P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$	P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$
1	0.00000700	176.008	5.68154588	0.12	0.0000583333	1	0.00000550	174.991	5.71458175	0.12	0.0000458333
2	0.00001550	176.008	11.3630918	0.12	0.0001291667	2	0.00001400	174.991	11.4291635	0.12	0.0001166667
3	0.00002600	176.008	17.0446376	0.12	0.0002166667	3	0.00002350	174.991	17.1437452	0.12	0.0001958333
4	0.00003650	176.008	22.7261835	0.12	0.0003041667	4	0.00003350	174.991	22.858327	0.12	0.0002791667
5	0.00004550	176.008	28.4077294	0.12	0.0003791667	5	0.00004350	174.991	28.5729087	0.12	0.0003625000
6	0.00005750	176.008	34.0892753	0.12	0.0004791667	6	0.00005400	174.991	34.2874905	0.12	0.0004500000
7	0.00006950	176.008	39.7708211	0.12	0.0005791667	7	0.00006600	174.991	40.0020722	0.12	0.0005500000
8	0.00009100	176.008	45.452367	0.12	0.0007583333	8	0.00007900	174.991	45.716654	0.12	0.0006583333

Carga P (ton)	MEZCLA M-6-I					
	Cilindro 3			Cilindro 4		
	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$	δ_1	δ_2	$\delta_{prom} (\mu m)$
1	4	12	8.0	5	13	9.0
2	7	31	19.0	17	28	22.5
3	14	47	30.5	23	44	33.5
4	20	65	42.5	32	57	44.5
5	28	82	55.0	47	72	59.5
6	37	101	69.0	62	85	73.5
7	46	182	114.0	80	102	91.0

Cilindro 3						Cilindro 4					
P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$	P (ton)	δ (m)	Área (cm ²)	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	L (m)	$\varepsilon = \delta/L$
1	0.0000800	175.507	5.69777379	0.12	0.0000666667	1	0.0000900	175.726	5.69066553	0.12	0.0000750000
2	0.00001900	175.507	11.3955476	0.12	0.0001583333	2	0.00002250	175.726	11.3813311	0.12	0.0001875000
3	0.00003050	175.507	17.0933214	0.12	0.0002541667	3	0.00003350	175.726	17.0719966	0.12	0.0002791667
4	0.00004250	175.507	22.7910951	0.12	0.0003541667	4	0.00004450	175.726	22.7626621	0.12	0.0003708333
5	0.00005500	175.507	28.4888689	0.12	0.0004583333	5	0.00005950	175.726	28.4533277	0.12	0.0004958333
6	0.00006900	175.507	34.1866427	0.12	0.0005750000	6	0.00007350	175.726	34.1439932	0.12	0.0006125000
7	0.00011400	175.507	39.8844165	0.12	0.0009500000	7	0.00009100	175.726	39.8346587	0.12	0.0007583333

Módulo de Elasticidad

A continuación se presentan las tablas y cálculos para determinar los módulos de elasticidad para cada mezcla. Cabe mencionar que para obtener los valores del esfuerzo correspondiente a 50 millonésimas de deformación unitaria y la deformación unitaria correspondiente al 40% del esfuerzo máximo en compresión se utilizó el método de **interpolación segmentaria lineal**.

Para la interpolación se utilizaron las siguientes expresiones matemáticas:

$$y - y_1 = m(x - x_1)$$

$$x = \frac{y - y_1}{m} + x_1$$

$$y = m(x - x_1) + y_1$$

MEZCLA M-1						
CILINDRO 1		CILINDRO 2				
$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)			
0.000000	0.0000	0.000000	0.0000	DATOS		
0.000071	5.6183	0.000071	5.6679	$\varepsilon_1 = 0.00005$		
0.000088	11.2366	0.000117	11.3358	$\sigma_2 = 99$		
0.000133	16.8550	0.000171	17.0037			
0.000183	22.4733	0.000213	22.6716			
0.000229	28.0916	0.000271	28.3395			
0.000483	56.1832	0.000508	56.6791			
0.000704	84.2748	0.000800	85.0186			
0.001046	112.3664	0.001146	113.3581			
CILINDRO	y(x) EN x=0.00005		x(y) EN y= 40% DE σ		Ec	Ec _{prom}
	m	y = σ_1	m	x = ε_2		
1	79317.4266	3.965871332	82219.2837	0.00087982	114182.692	108727
2	80017.5169	4.000875844	81945.6498	0.00096716	103270.727	

MEZCLA M-3						
CILINDRO 1		CILINDRO 2				
$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)			
0.000000	0.0000	0.000000	0.0000	DATOS		
0.000129	5.6970	0.000133	5.6079	$\varepsilon_1 = 0.00005$		
0.000188	11.3940	0.000192	11.2158	$\sigma_2 = 88$		
0.000246	17.0910	0.000242	16.8236			
0.000292	22.7880	0.000296	22.4315			
0.000358	28.4851	0.000350	28.0394			
0.000638	56.9701	0.000629	56.0788			
0.000954	85.4552	0.000946	84.1182			
0.001113	96.8492	0.001088	95.3340			
CILINDRO	y(x) EN x=0.00005		x(y) EN y= 40% DE σ		Ec	Ec _{prom}
	m	y = σ_1	m	x = ε_2		
1	44105.8959	2.205294794	71962.2512	0.00098415	91428.0973	91199.30088
2	42059.1178	2.10295589	79170.1041	0.00098997	90970.5044	

MEZCLA M-5						
CILINDRO 1		CILINDRO 2				
$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)			
0.000000	0.0000	0.000000	0.0000	DATOS		
0.000071	5.6328	0.000058	5.5753			
0.000129	11.2656	0.000125	11.1505	$\sigma_2 = 53$		
0.000188	16.8983	0.000213	16.7258			
0.000250	22.5311	0.000254	22.3011			
0.000317	28.1639	0.000329	27.8764			
0.000388	33.7967	0.000396	33.4516			
0.000529	45.0622	0.000546	44.6022			
0.000679	56.3278	0.000688	55.7527			
CILINDRO	y(x) EN x=0.00005		x(y) EN y= 40% DE σ		Ec	Ec _{prom}
	m	y = σ_1	m	x = ε_2		
1	79521.549	3.976077452	75103.6852	0.00063713	83788.1726	81908
2	95576.1286	4.778806428	78709.7529	0.0006547	80026.8862	

MEZCLA M-7						
CILINDRO 1		CILINDRO 2				
$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)			
0.000000	0.0000	0.000000	0.0000	DATOS		
0.000058	5.6735	0.000058	5.6684			
0.000121	11.3469	0.000117	11.3368	$\sigma_2 = 55$		
0.000183	17.0204	0.000175	17.0052			
0.000254	22.6938	0.000238	22.6736			
0.000317	28.3673	0.000304	28.3421			
0.000388	34.0407	0.000375	34.0105			
0.000554	45.3877	0.000513	45.3473			
0.000713	56.7346	0.000663	56.6841			
CILINDRO	y(x) EN x=0.00005		x(y) EN y= 40% DE σ		Ec	Ec _{prom}
	m	y = σ_1	m	x = ε_2		
1	97259.2785	4.862963923	71664.7315	0.00069307	78497.1896	81689.98569
2	97172.7719	4.858638597	75578.8226	0.00064474	84882.7818	

MEZCLA M-9						
CILINDRO 1		CILINDRO 2				
$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)			
0.000000	0.0000	0.000000	0.0000		DATOS	
0.000083	5.5625	0.000058	5.6458		$\varepsilon_1 = 0.00005$	
0.000133	11.1250	0.000121	11.2916		$\sigma_2 = 66$	
0.000200	16.6875	0.000183	16.9374			
0.000263	22.2500	0.000254	22.5831			
0.000325	27.8125	0.000329	28.2289			
0.000383	33.3750	0.000388	33.8747			
0.000538	44.5001	0.000538	45.1663			
0.000679	55.6251	0.000696	56.4579			
0.000833	66.7501	0.000850	67.7494			
CILINDRO	y(x) EN x=0.00005		x(y) EN y= 40% DE σ		Ec	Ec _{prom}
	m	y = σ_1	m	x = ε_2		
1	66750.0786	4420872.601	72162.2472	0.00082613	66750.9113	81768.5202
2	96784.9173	6410086.665	73242.6401	0.00082926	96786.1291	

MEZCLA M-11						
CILINDRO 1		CILINDRO 2				
$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)			
0.000000	0.0000	0.000000	0.0000		DATOS	
0.000092	5.6418	0.000079	5.6183		$\varepsilon_1 = 0.00005$	
0.000163	11.2836	0.000154	11.2366		$\sigma_2 = 50$	
0.000246	16.9253	0.000242	16.8550			
0.000333	22.5671	0.000313	22.4733			
0.000413	28.2089	0.000392	28.0916			
0.000604	39.4925	0.000571	39.3282			
0.000813	50.7760	0.000763	50.5649			
CILINDRO	y(x) EN $x=0.00005$		x(y) EN $y= 40\%$ DE σ		Ec	Ec _{prom}
	m	$y = \sigma_1$	m	$x = \varepsilon_2$		
1	61546.6781	3.077333907	54161.0768	0.00079856	62712.0182	64398.58887
2	70968.2238	3.548411192	58625.924	0.00075322	66085.1596	

MEZCLA M-13						
CILINDRO 1		CILINDRO 2				
$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)			
0.000000	0.0000	0.000000	0.0000		DATOS	
0.000058	2.8390	0.000029	2.8259		$\varepsilon_1 = 0.00005$	
0.000113	5.6780	0.000075	5.6518		$\sigma_2 = 21$	
0.000163	8.5170	0.000138	8.4777			
0.000204	11.3560	0.000188	11.3036			
0.000258	14.1950	0.000250	14.1295			
0.000313	17.0340	0.000304	16.9554			
0.000363	19.8730	0.000371	19.7813			
0.000408	22.7120	0.000417	22.6072			
CILINDRO	y(x) EN $x=0.00005$		x(y) EN $y= 40\%$ DE σ		Ec	Ec _{prom}
	m	$y = \sigma_1$	m	$x = \varepsilon_2$		
1	48668.6166	2.433430828	61941.8756	0.00038808	56270.9043	52003.54146
2	96888.1178	4.844405891	61656.075	0.00039802	47736.1786	

- Material irradiado.

MEZCLA M-1-I						
CILINDRO 9		CILINDRO 10				
$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)			
0.000000	0.0000	0.000000	0.0000			DATOS
0.000058	5.7161	0.000029	5.6932			$\varepsilon_1 = 0.00005$
0.000100	11.4322	0.000083	11.3864			$\sigma_2 = 71$
0.000163	17.1483	0.000146	17.0796			
0.000217	22.8645	0.000208	22.7728			
0.000271	28.5806	0.000271	28.4660			
0.000513	57.1611	0.000579	56.9320			
0.000913	74.3095	0.001046	74.0116			
CILINDRO	y(x) EN x=0.00005		x(y) EN y= 40% DE σ		Ec	Ec _{prom}
	m	y = σ_1	m	x = ε_2		
9	97990.5159	4.899525796	42870.8507	0.00084694	83568.791	75078.5139
10	195195.52	9.759776002	36599.16	0.00097718	66588.2368	

MEZCLA M-2-I						
CILINDRO 7		CILINDRO 9				
$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)			
0.000000	0.0000	0.000000	0.0000			DATOS
0.000058	5.6831	0.000054	5.6937			$\varepsilon_1 = 0.00005$
0.000108	11.3661	0.000104	11.3874			$\sigma_2 = 64$
0.000171	17.0492	0.000167	17.0811			
0.000229	22.7323	0.000238	22.7748			
0.000300	28.4153	0.000300	28.4686			
0.000638	56.8306	0.000654	56.9371			
0.001067	68.1968	0.001063	68.3245			
CILINDRO	y(x) EN x=0.00005		x(y) EN y= 40% DE σ		Ec	Ec _{prom}
	m	y = σ_1	m	x = ε_2		
7	97423.9594	4.87119797	26484.1831	0.00092281	68188.4383	68026.7996
9	105114.652	5.255732583	27887.5606	0.0009213	67865.161	

MEZCLA M-3-I						
CILINDRO 5		CILINDRO 7				
$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)			
0.000000	0.0000	0.000000	0.0000			DATOS
0.000054	5.6709	0.000054	5.6408			$\varepsilon_1 = 0.00005$
0.000092	11.3419	0.000113	11.2816			$\sigma_2 = 61$
0.000158	17.0128	0.000167	16.9223			
0.000225	22.6837	0.000250	22.5631			
0.000296	28.3547	0.000321	28.2039			
0.000646	56.7093	0.000646	56.4078			
0.000725	62.3803	0.000850	62.0486			
CILINDRO	y(x) EN x=0.00005		x(y) EN y= 40% DE σ		Ec	Ec _{prom}
	m	y = σ_1	m	x = ε_2		
5	104694.165	5.234708272	71632.85	0.00070118	85136.6752	79534.3782
7	104137.431	5.206871532	27628.2979	0.00080024	73932.0811	

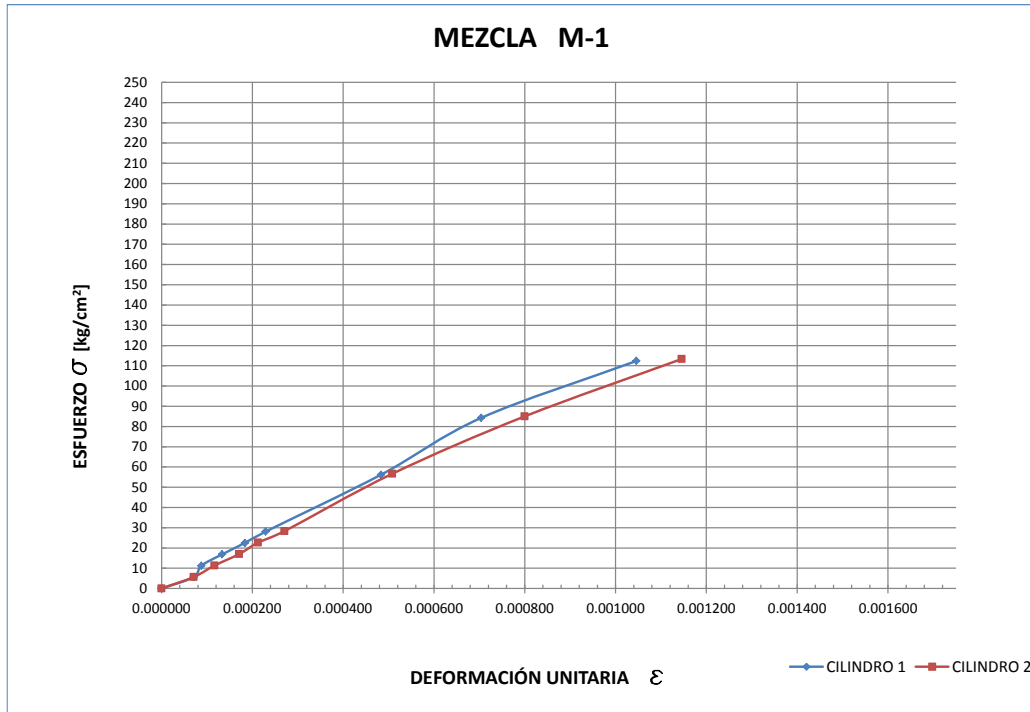
MEZCLA M-4-I						
CILINDRO 3		CILINDRO 4				
$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)			
0.000000	0.0000	0.000000	0.0000			DATOS
0.000042	5.5965	0.000046	5.6388			$\varepsilon_1 = 0.00005$
0.000092	11.1930	0.000100	11.2776			$\sigma_2 = 65$
0.000154	16.7895	0.000171	16.9163			
0.000217	22.3859	0.000229	22.5551			
0.000288	27.9824	0.000275	28.1939			
0.000629	55.9649	0.000600	56.3878			
0.000796	67.1578	0.000871	67.6653			
CILINDRO	y(x) EN x=0.00005		x(y) EN y= 40% DE σ		Ec	Ec _{prom}
	m	y = σ_1	m	x = ε_2		
3	111929.73	6.529234258	67157.8381	0.00075769	82051.3508	80138.4956
4	123027.832	6.151391585	41640.1892	0.00079713	78225.6403	

MEZCLA M-5-I						
CILINDRO 3		CILINDRO 4				
$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)			
0.000000	0.0000	0.000000	0.0000			DATOS
0.000058	5.6815	0.000046	5.7146			$\varepsilon_1 = 0.00005$
0.000129	11.3631	0.000117	11.4292			$\sigma_2 = 41$
0.000217	17.0446	0.000196	17.1437			
0.000304	22.7262	0.000279	22.8583			
0.000379	28.4077	0.000363	28.5729			
0.000479	34.0893	0.000450	34.2875			
0.000579	39.7708	0.000550	40.0021			
0.000758	45.4524	0.000658	45.7167			
CILINDRO	y(x) EN x=0.00005		x(y) EN y= 40% DE σ		Ec	Ec _{prom}
	m	y = σ_1	m	x = ε_2		
3	97397.9293	4.869896467	31710.9537	0.00062295	63337.9072	65301.894
4	80676.4482	6.050733613	52749.9853	0.00057193	67265.8809	

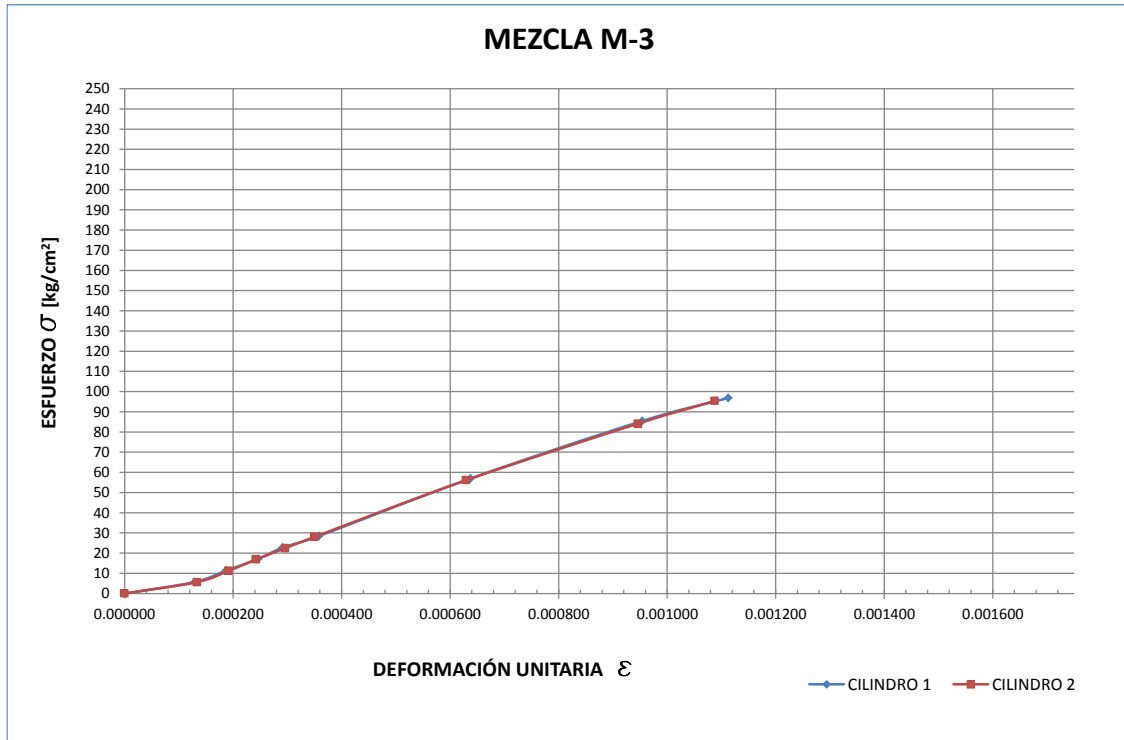
MEZCLA M-6-I						
CILINDRO 3		CILINDRO 4				
$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	$\varepsilon = \delta/L$	$\sigma = P/A$ (kg/cm ²)			
0.000000	0.0000	0.000000	0.0000			DATOS
0.000067	5.6978	0.000075	5.6907			$\varepsilon_1 = 0.00005$
0.000158	11.3955	0.000188	11.3813			$\sigma_2 = 30$
0.000254	17.0933	0.000279	17.0720			
0.000354	22.7911	0.000371	22.7627			
0.000458	28.4889	0.000496	28.4533			
0.000575	34.1866	0.000613	34.1440			
0.000950	39.8844	0.000758	39.8347			
CILINDRO	y(x) EN x=0.00005		x(y) EN y= 40% DE σ		Ec	Ec _{prom}
	m	y = σ_1	m	x = ε_2		
3	85466.6068	4.27333034	48838.061	0.00049934	58348.3806	56549.8191
4	75875.5404	3.793777022	48777.1331	0.00053762	54751.2577	

Gráficas Esfuerzo-Deformación unitaria

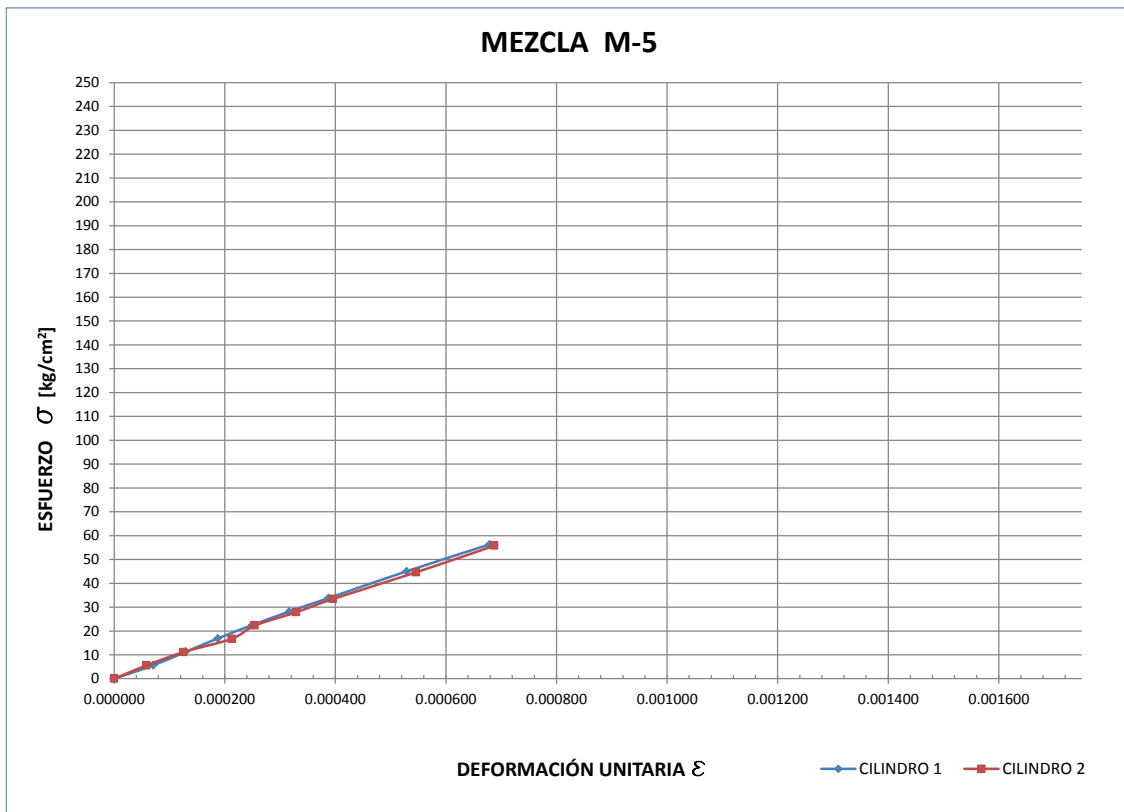
Las gráficas que a continuación se presentan hacen referencia al comportamiento de los dos cilindros empleados por cada mezcla los cuales se usaron para determinar el módulo de elasticidad de las mismas.



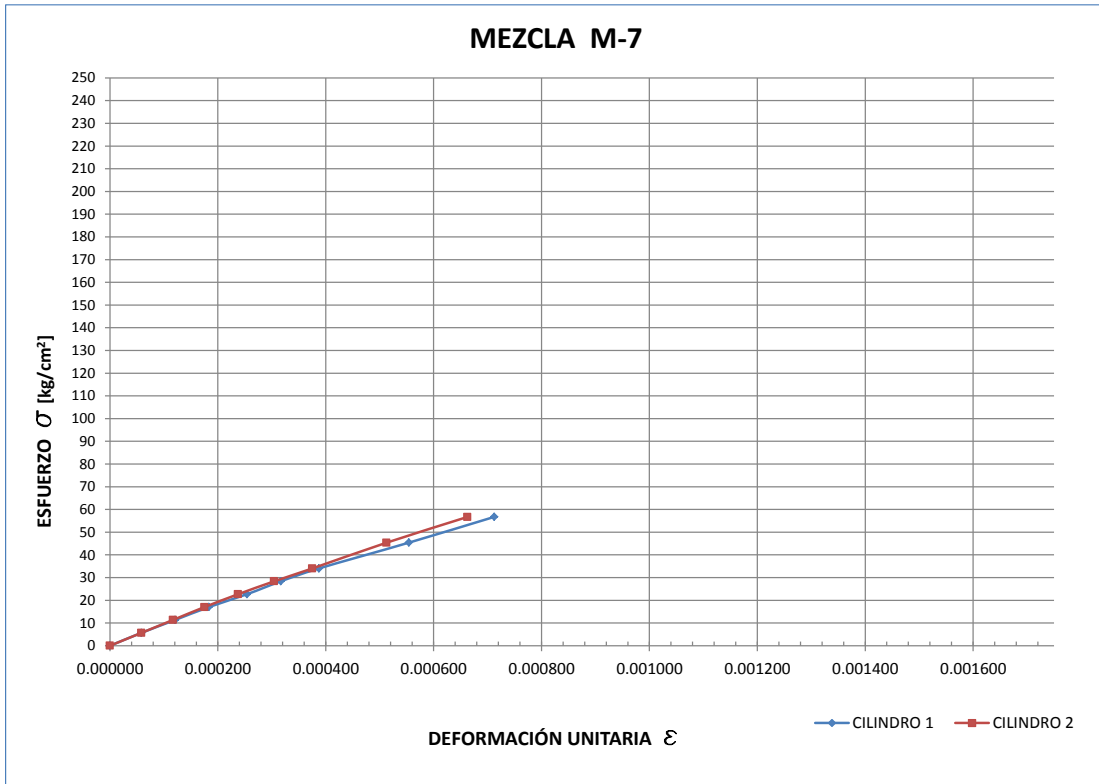
Grafica 1. Esfuerzo-Deformación unitaria, Testigos



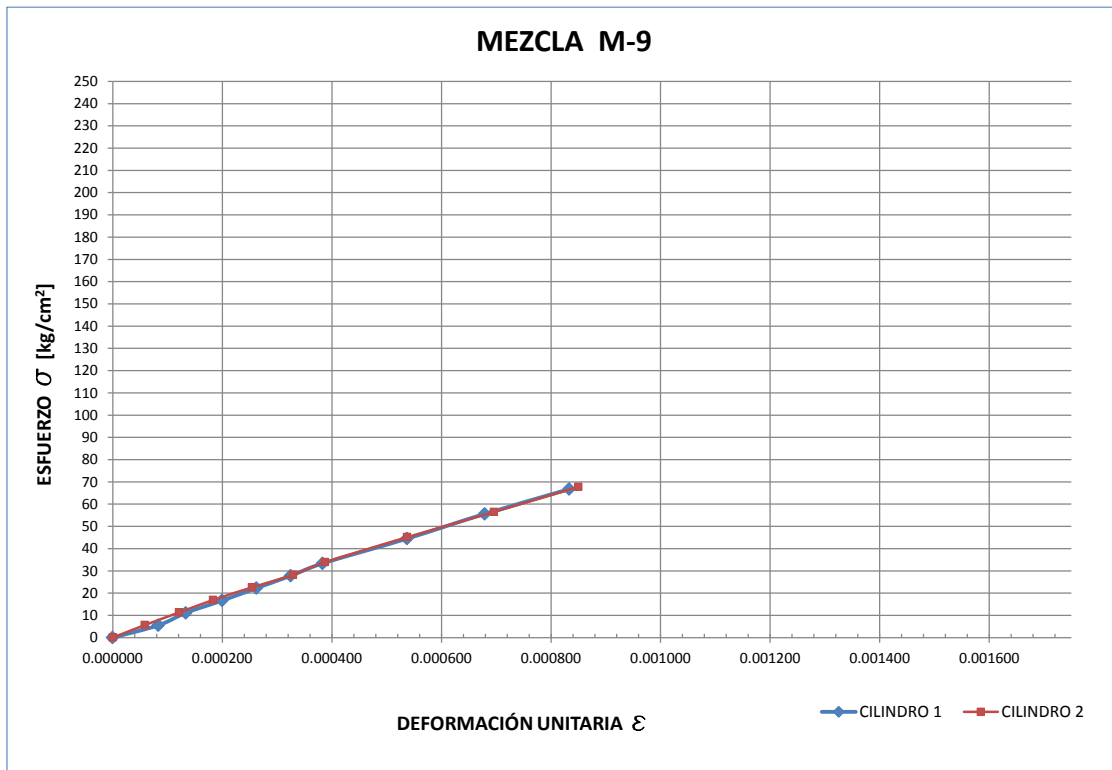
Grafica 2. Esfuerzo-Deformación unitaria 10% (7 mesh), material sin irradiar.



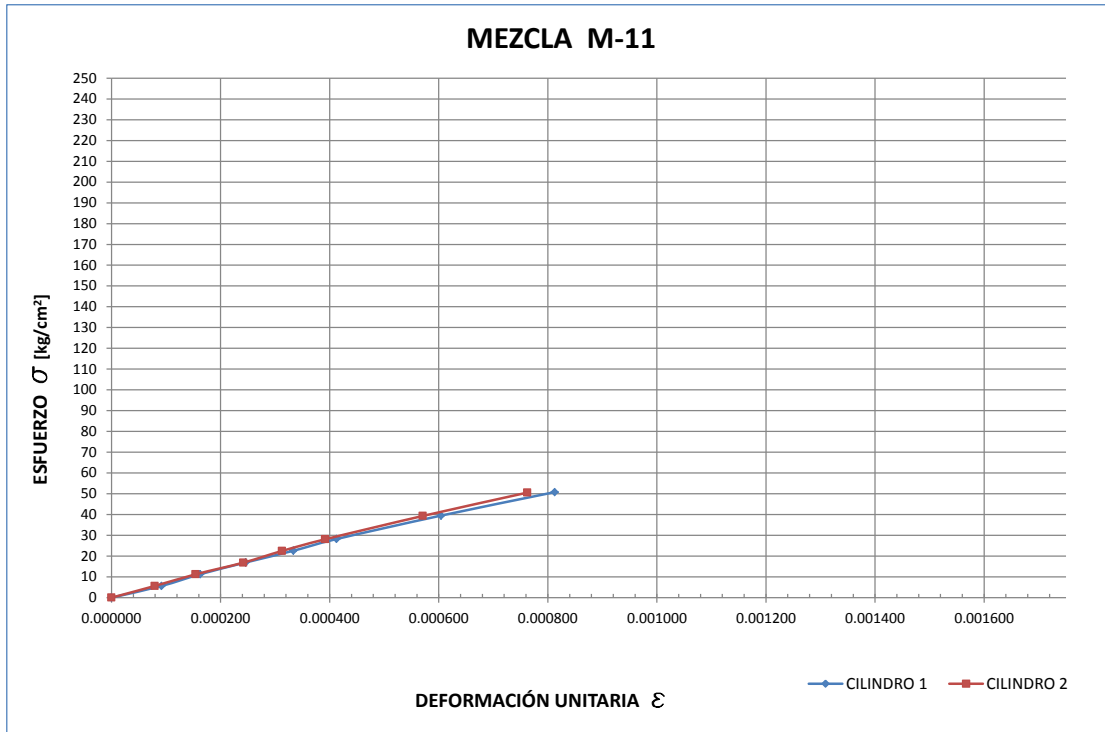
Grafica 3. Esfuerzo-Deformación unitaria 20% (7 mesh), material sin irradiar.



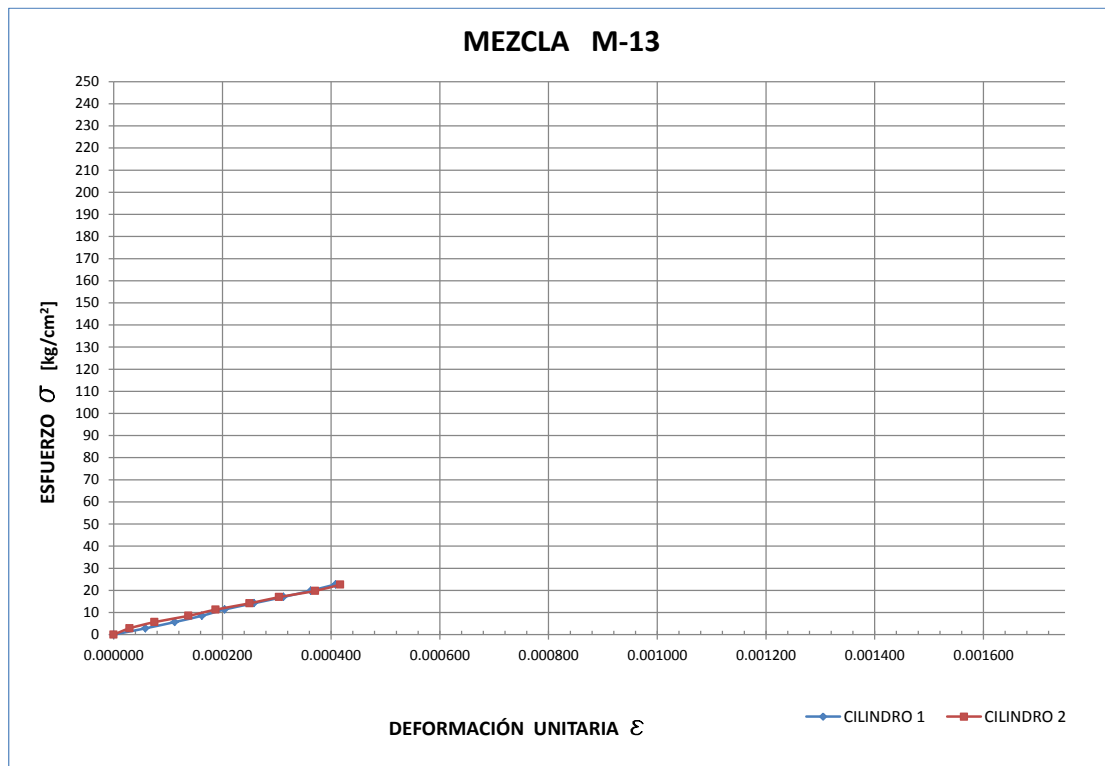
Gráfica 4. Esfuerzo-Deformación unitaria 30% (7 mesh), material sin irradiar.



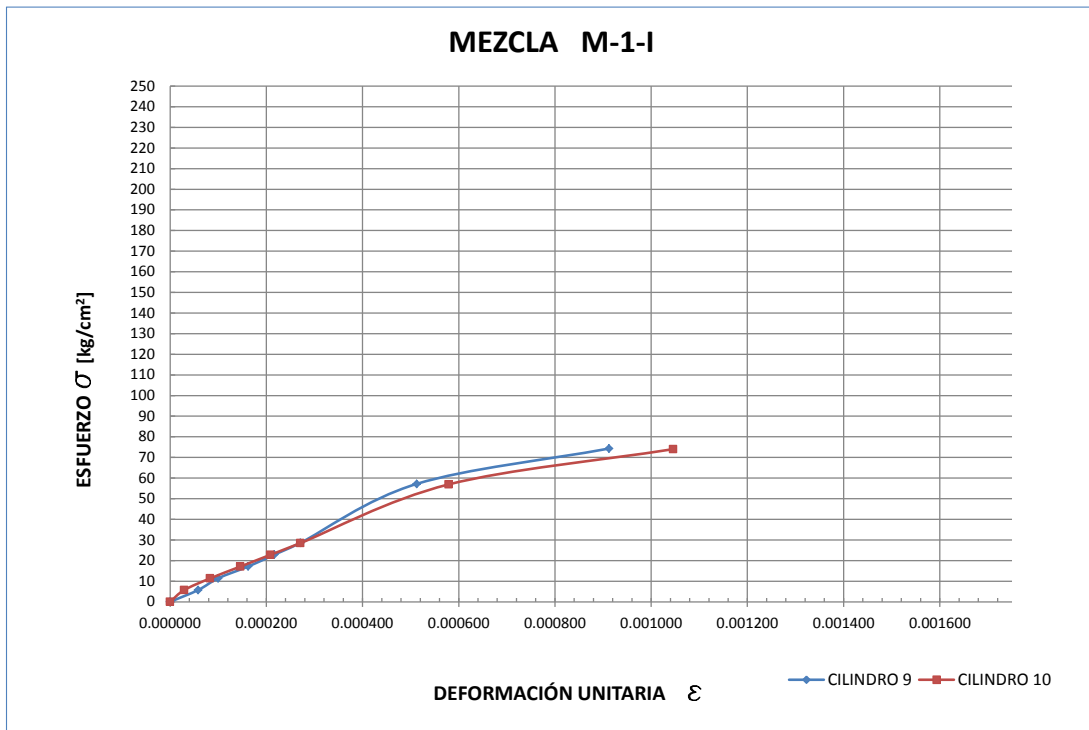
Gráfica 5. Esfuerzo-Deformación unitaria 10% (20 mesh), material sin irradiar.



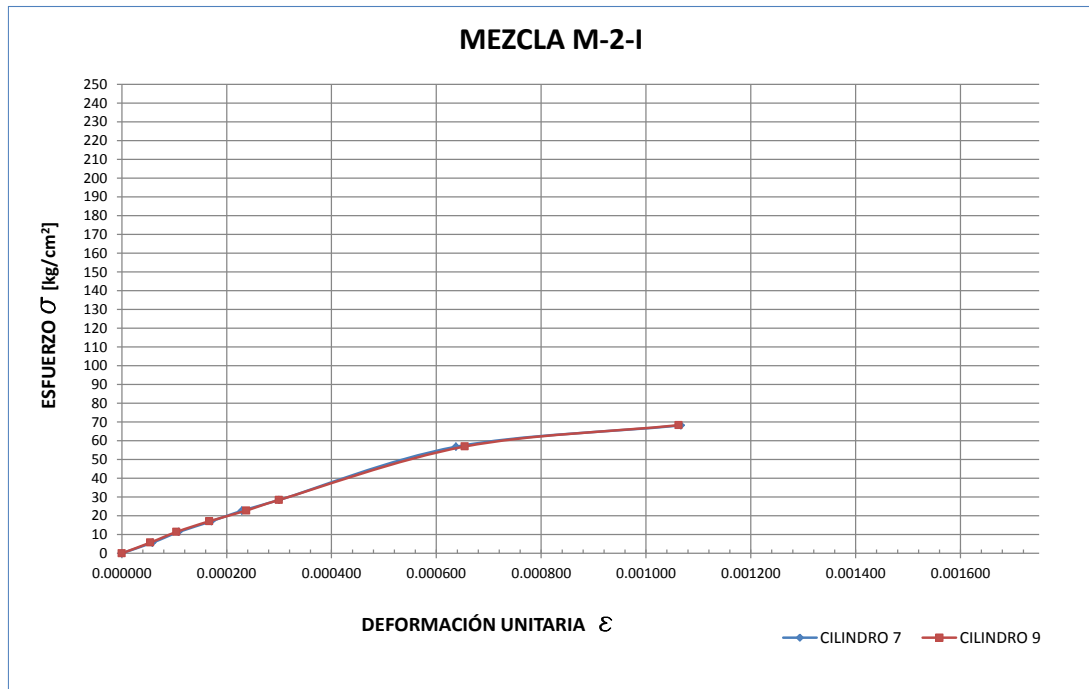
Grafica 6. Esfuerzo-Deformación unitaria 20% (20 mesh), material sin irradiar.



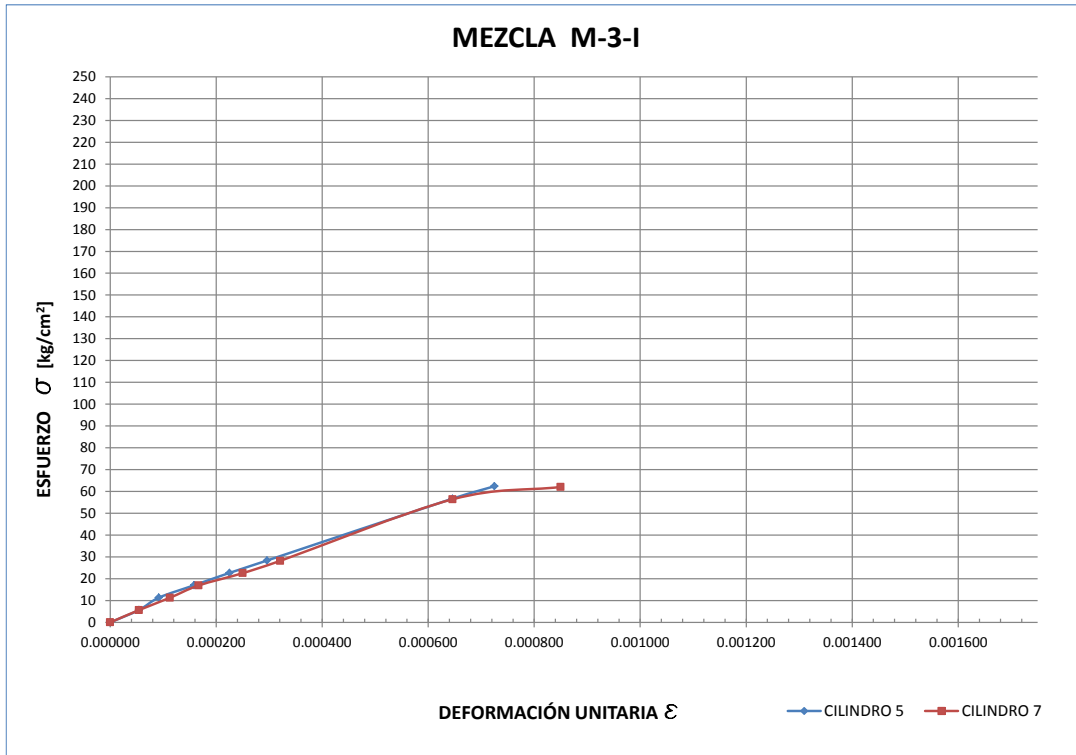
Grafica 7. Esfuerzo-Deformación unitaria 30% (20 mesh), material sin irradiar.



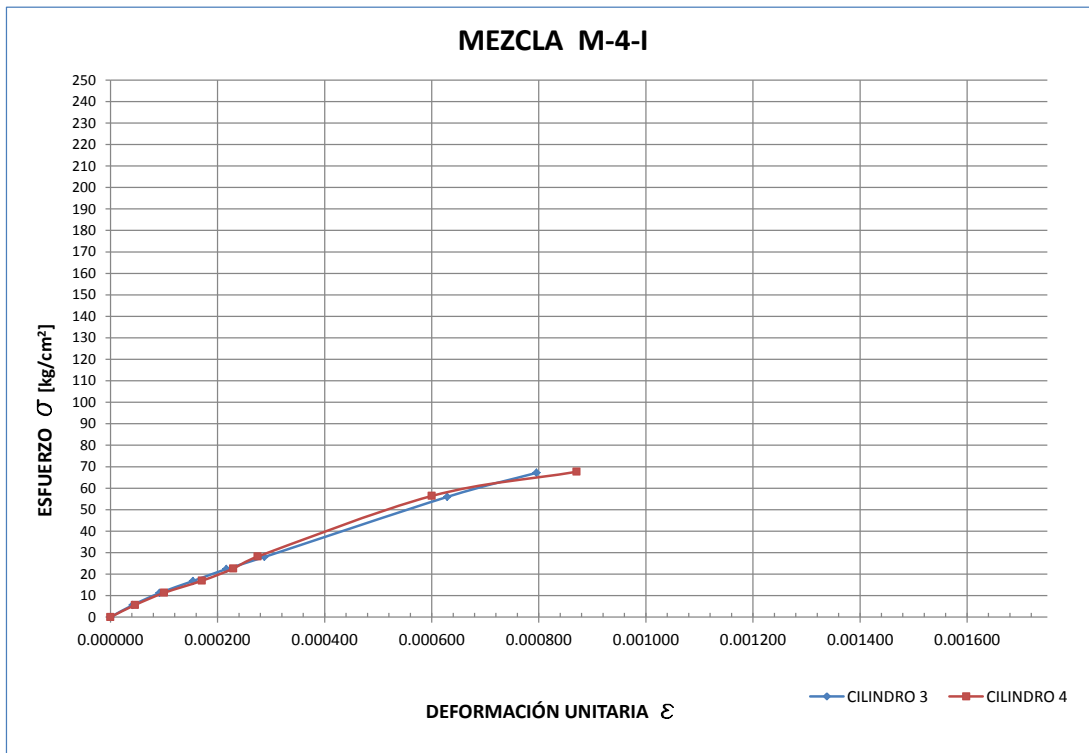
Grafica 8. Esfuerzo-Deformación unitaria 10% (2-3 mm), material irradiado.



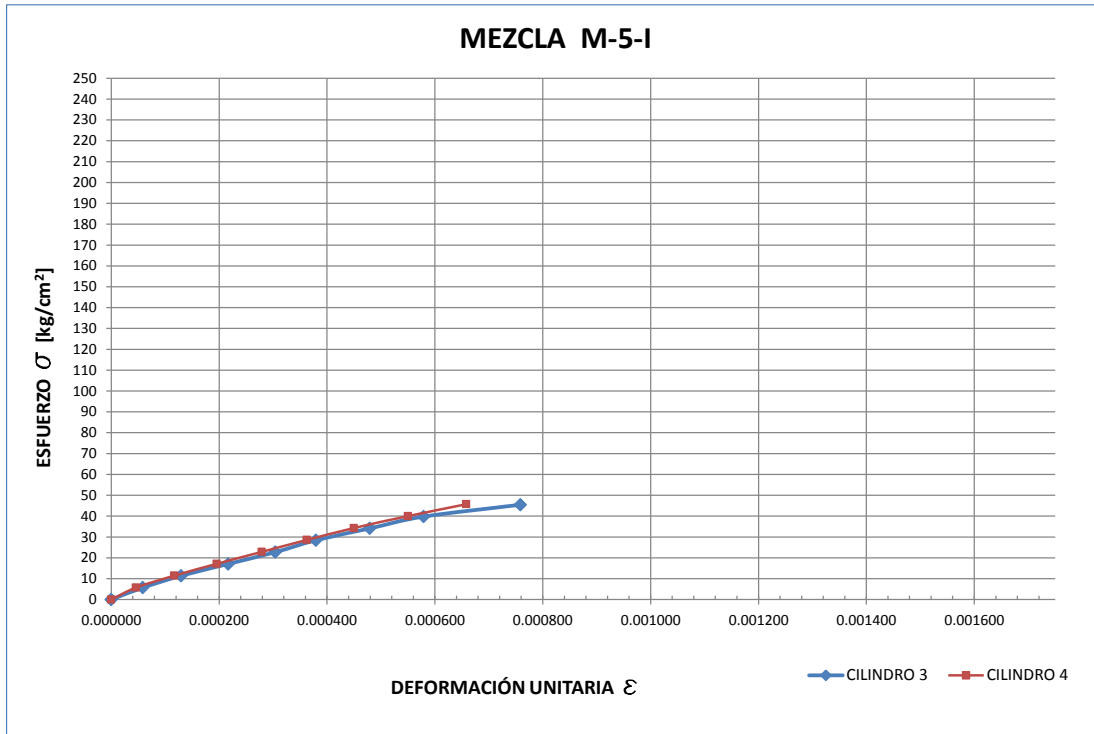
Grafica 9. Esfuerzo-Deformación unitaria 20% (2-3 mm), material irradiado.



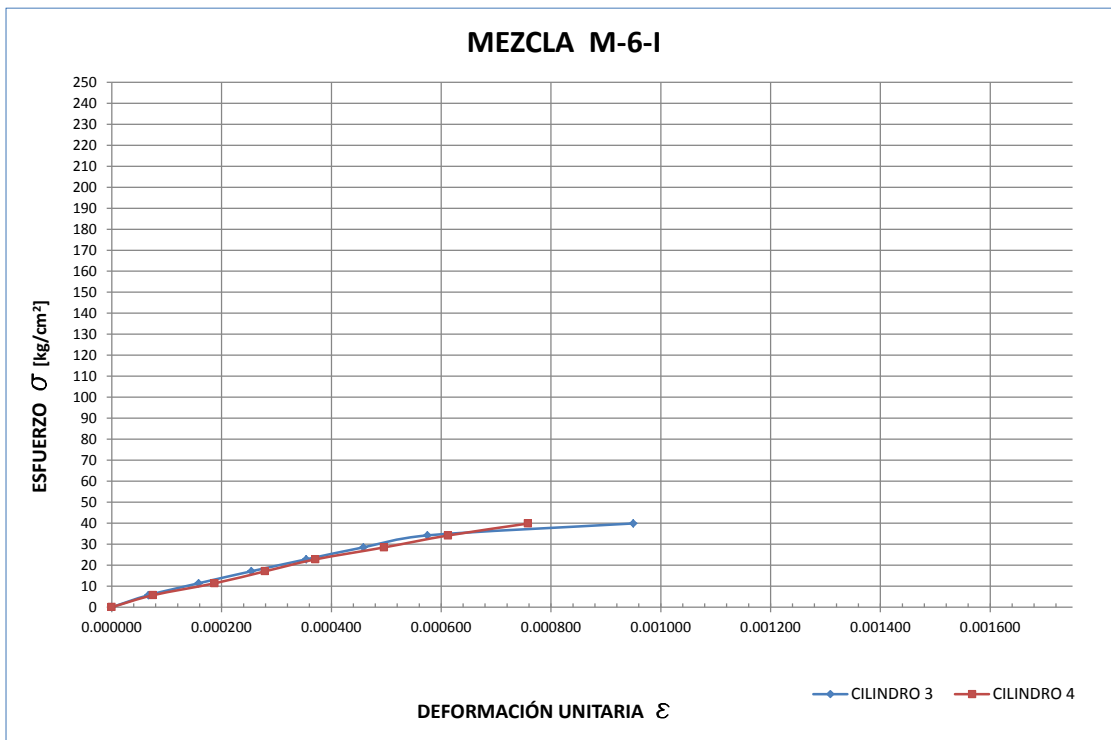
Grafica 10. Esfuerzo-Deformación unitaria 30% (2-3 mm), material irradiado.



Grafica 11. Esfuerzo-Deformación unitaria 10% (20 mesh), material irradiado.



Grafica 12. Esfuerzo-Deformación unitaria 20% (20 mesh), material irradiado.



Grafica 13. Esfuerzo-Deformación unitaria 30% (20 mesh), material irradiado.

Resistencia a la tensión por compresión diametral

Las siguientes tablas muestran el resumen de resultados de la prueba de resistencia a la tensión por compresión diametral.

RESISTENCIA A LA TENSION POR COMPRESIÓN DIAMETRAL (PRUEBA BRASILEÑA)						
Mezcla	Cilindro	Carga máxima aplicada P [kg]	Longitud [cm]	Diámetro [cm]	Resistencia a la tensión por compresión diametral $F_c''T$ [kg/cm ²]	Resistencia a la tensión por compresión diametral $F_c''T_{prom}$ [kg/cm ²]
M-1	CIL 5	13861	31.03	15.07	18.88	20.62
	CIL 6	15675	29.29	15.24	22.36	
M-3	CIL 5	15436	29.63	14.94	22.19	21.36
	CIL 6	14728	29.98	15.24	20.52	
M-5	CIL 5	8976	31.94	14.96	11.96	11.40
	CIL 6	8153	32.25	14.84	10.84	
M-7	CIL 5	9510	30.64	15.41	12.83	11.55
	CIL 6	7244	30.17	14.88	10.27	
M-9	CIL 5	10410	30.08	15.00	14.68	13.76
	CIL 6	9769	32.27	15.02	12.83	
M-11	CIL 5	8473	30.00	15.11	11.90	12.21
	CIL 6	8835	30.00	14.98	12.52	
M-13	CIL 5	6345	32.04	15.03	8.39	7.55
	CIL 6	5099	32.17	15.04	6.71	

RESISTENCIA A LA TENSION POR COMPRESIÓN DIAMETRAL (PRUEBA BRASILEÑA), MAT. IRRADIADO						
Mezcla	Cilindro	Carga máxima aplicada P [kg]	Longitud [cm]	Diámetro [cm]	Resistencia a la tensión por compresión diametral $F_c''T$ [kg/cm ²]	Resistencia a la tensión por compresión diametral $F_c''T_{prom}$ [kg/cm ²]
M-1-I	CIL 5	10571	30.00	14.95	15.01	15.06
	CIL 6	10734	30.21	14.97	15.12	
M-2-I	CIL 1	8971	29.89	14.94	12.79	13.01
	CIL 3	9491	30.35	15.04	13.24	
M-3-I	CIL 6	8288	30.09	15.05	11.65	12.03
	CIL 8	8746	30.05	14.94	12.40	
M-4-I	CIL 5	9949	30.04	14.95	14.11	14.13
	CIL 6	10000	29.94	15.02	14.16	
M-5-I	CIL 5	6626	30.17	14.98	9.33	8.98
	CIL 6	6096	30.13	14.94	8.62	
M-6-I	CIL 5	4812	30.18	15.02	6.76	7.70
	CIL 6	6076	29.91	14.97	8.64	