

Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Química



“Caracterización fisicoquímica de partículas de llanta de reciclado irradiadas y su uso en materiales compuestos”

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
QUIMICO**

**PRESENTA:
IVAN GONZALEZ ALVAREZ**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. GONZALO MARTINEZ BARRERA**

**COASESOR DE TESIS
DRA. NELLY MARÍA DE LA PAZ GONZALEZ RIVAS**

Toluca, Estado de México a marzo de 2018

DEDICATORIA

A mis padres Cándido y María del Socorro por su fuerza, trabajo y comprensión.

A mis hermanos (Edgar, Gustavo), abuelitos (Aurelia, Paulina y Zenón) y familiares, por ser parte de mí en distintas etapas de mi vida.

A Margarita, Estefanía, Joyce, Diana y Jorge por su amistad y por haber vivido momentos agradables.

Y por último al Dr. Carlos González Romero por su atención, consejos, regaños que me hicieron entender que las barreras no son un pretexto para no lograr tus objetivos.

*Este soy yo para siempre
Uno sin nombre
Estas líneas el último esfuerzo
Para encontrar la línea de vida que falta
Nightwish*

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Gonzalo Martínez Barrera por su tiempo, atención, paciencia a la realización de este trabajo de investigación.

Agradezco al Dr. Enrique Viguera Santiago, Dra. Dora Alicia Solís Casados y al Dr. Oscar Fernando Olea Mejía, por su tiempo en la realización de las pruebas de caracterización.

A Miguel por su enseñanza y orientación a problemas que sucedieron durante la investigación.

INDICE

	Página
RESUMEN	10
OBJETIVOS	11
PREGUNTA DE INVESTIGACION	12
INTRODUCCION	13
CAPITULO 1: ANTECEDENTES	15
1.1 Concreto	15
1.2 Cemento Portland	16
1.2.2 Etapas de hidratación del cemento	
1.2.3 Estructura del gel C-S-H: producto de la hidratación del cemento Portland	
1.3 Agregados	21
1.4 Llanta automotriz	23
1.4.1 Composición de llantas	
1.4.2 Hule natural (NR)	
1.4.3 Hule sintético	
1.4.4 Poli butadieno (BR)	
1.4.5 Estireno-butadieno (SBR)	
1.4.6 Poliisopreno (IR)	
1.5 Vulcanización del hule	29
1.6 Reciclaje de llantas automotrices	30
1.7 Radiación gamma. Mecanismo de reacción	32
1.8 Estudios de llantas automotrices utilizadas en el concreto	37
CAPITULO 2: MATERIALES Y METODOLOGÍA	
2.1 Proceso de obtención de partículas de hule de llanta	40
2.2 Irradiación de partículas de hule de llanta	40
2.3 Técnicas de caracterización	41
2.3.1 Espectroscopia Infrarroja	

2.3.2 Espectroscopia ultravioleta-visible	
2.3.3 Espectroscopia Raman	
2.3.4 Difracción de rayos X	
2.3.5 Microscopia electrónica de barrido (SEM)	
2.3.6 Análisis termo gravimétrico (TGA) y Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	
2.4 Materiales usados para la elaboración de probetas de concreto	45
2.4.1 Partículas de llanta de recicló	
2.4.2 Cemento	
2.4.3 Agregados finos y gruesos: Arena y Grava	
2.4.4 Agua	
2.5 Elaboración de concreto hidráulico sin partículas de hule de llanta	47
2.6 Elaboración de concreto hidráulico con partículas de hule de llanta	50
2.7 Determinación de la resistencia a la compresión	53
2.8 Cálculo del módulo elástico de concretos	54
CAPITULO 3: RESULTADOS	
3.1 Resistencia a la compresión de concreto testigo	57
3.2 Resistencia a la compresión de concreto con hule de llanta sin irradiar	58
3.3 Resistencia a la compresión de concreto con partículas de llanta irradiadas	61
3.3.1 Concreto con partículas irradiadas a 200 kGy	
3.3.2 Concreto con partículas irradiadas a 250 kGy	
3.3.3 Concreto con partículas irradiadas a 300 kGy	
3.3.4 Resistencia a la compresión de concreto con partículas de 0.85 mm	
3.3.5 Resistencia a la compresión de concreto con partículas de 2.80 mm	
3.4 Caracterización fisicoquímica de las partículas de llanta	68
CONCLUSIONES	80
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	82

INDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Estructura de la 1,4 nm tobermorita y la jennita	20
Figura.1.1	Estructura del gel C-S-H	21
Figura 1.2	Partes de una llanta de automóvil	23
Figura 1.3	1,4-cis poli butadieno	26
Figura 1.4	1,4-trans poli butadieno	26
Figura 1.5	Monómero estireno, 1,3-butadieno	27
Figura 1.6	Subunidad polimérica de SBR	27
Figura 1.7	Monómero de isopreno	28
Figura 1.8	Estructuras poli-cis-1,4-isopreno (hule natural) y poli-trans-1,4-isopreno	29
Figura 1.9 y 1.10	Obtención de partículas con diámetro de 1 a 17 mm	31
Figura 1.11	Productos de reciclado de llantas	31
Figura 1.12	Reacción del efecto de la radiación en SBR	36
Figura 2	Fig. 2. Espectrómetro uv-visible, con esfera de integración	40
Figura 2.1	Difractómetro de rayos X de polvos	41
Figura 2.2	SEM JEOL JSM-6510LV	42
Figura 2.3	Equipo Analizador térmico Netzsch modelo STA 449 F3 Júpiter	43
Figura 2.4	Probetas de acero	46
Figura 2.5	Código utilizado para designar a cada tipo de probeta	50
Figura 2.6	Máquina Universal de Ensayos marca Controls ^{MR} para pruebas mecánicas	50
Figura 2.7	Programa CONTROLS para pruebas mecánicas	51
Figura 2.8	Ejemplo de concreto cilíndrico para cálculo de resistencia a la compresión	51
Figura 2.9	Metodología general para la elaboración de concreto hidráulico con partículas de llanta de reciclado	53

Figura 3	Resistencia a la compresión de concreto testigo a 7,14 y 28 días	55
Figura 3.1	Resistencia a la compresión vs deformación de concreto testigo a 7, 14 y 28 días	55
Figura 3.2	Resistencia a la compresión de concreto con partículas sin irradiar	57
Figura 3.3	Resistencia a la compresión de concreto con partículas irradiadas a 200 kGy	59
Figura 3.4	Resistencia a la compresión de concreto con partículas irradiadas a 250 kGy	61
Figura 3.5	Resistencia a la compresión de concreto con partículas irradiadas a 300 kGy	62
Figura 3.6	Comparación del módulo elástico en relación a la dosis de irradiación	64
Figura 3.7	Resistencia a la compresión de concreto con partículas irradiadas de 0.85 mm	64
Figura 3.8	Resistencia a la compresión de concreto con partículas irradiadas de 2.80 mm	65
Figura 3.9	Espectro infrarrojo de partículas llanta irradiadas y sin irradiar (4000 a 2000 cm^{-1})	66
Figura 3.10	Espectro infrarrojo de partículas llanta irradiadas y sin irradiar (2000 a 735 cm^{-1})	67
Figura 3.11	Espectro UV-visible de partículas de llantas irradiadas y sin irradiar	68
Figura 3.12	Espectro Raman de partículas de llanta irradiadas y sin irradiar	69
Figura 3.13	Imágenes SEM de hule de llanta a 100x	71
Figura 3.14	Imágenes de SEM de partículas de llanta a 1500x	72
Figura 3.15	Termograma de partículas de llanta	73
Figura 3.16	Calorimetría diferencial de barrido de partículas de llanta irradiada y sin irradiar	75
Figura 3.17	Espectro difracción de rayos x de partículas de llanta	76

INDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1	Abreviación de óxidos principales en el cemento Portland	17
Tabla 1.1	Clasificación del cemento por su resistencia	18
Tabla 1.2	Composición de llantas	24
Tabla 1.3	Materiales que componen los diferentes tipos de llanta	24
Tabla 1.4	Diferencias entre la polimerización SBR solución y SBR emulsión	27
Tabla 1.5	Resistencia a la flexión de concreto con hule	37
Tabla 2	Resistencia a la compresión del cemento	44
Tabla 2.1	Límites granulométricos para el agregado fino	44
Tabla 2.2	Tamices para 1000 g de grava	45
Tabla 2.3	Relaciones de los componentes para elaboración de concreto	46
Tabla 2.4	Resistencia a la compresión del concreto R3	46
Tabla 2.5	Volumen y peso de componentes para un m ³ de concreto	47
Tabla 2.6	Cantidad de material para una probeta de concreto	47
Tabla 2.7	Cantidad de material (g) para una probeta de concreto con refuerzo	48
Tabla 3	Esfuerzo, deformación y módulo de elasticidad de concretos testigo a 7, 14 y 28 días	56

Tabla 3.1	Resistencia, deformación máxima y módulo de elasticidad de concretos a los 28 días de curado	58
Tabla 3.2	Esfuerzo, deformación máxima y módulo de elasticidad de concretos a los 28 días	60
Tabla 3.3	Resistencia, deformación máxima y módulo de elasticidad de concretos con partículas irradiadas a 250 kGy	61
Tabla 3.4	Esfuerzo, deformación máxima y módulo de elasticidad de concreto a los 28 días	63
Tabla 3.5	Bandas Raman de partículas de hule	69
Tabla 3.6	Temperatura 10%, transición vítrea y descomposición de partículas de hule no irradiadas e irradiadas	73

RESUMEN

El reciclaje de materiales de desecho como: vidrio, baterías, concreto, papel, cartón, plástico, Tetra Pak, computadoras, llantas, entre otros, cuyo tiempo de vida útil es limitado y que causa daño al ambiente, ha provocado la atención de investigadores. Cabe mencionar el caso del reciclaje de llantas automotrices en México, del cual se tiene escasa cultura; solo se recicla el 5% de los 40 millones de llantas que se generan anualmente, el resto se arrojan a la intemperie en lugares públicos, resultando contraproducente para la salud, ya que son lugares perfectos para el estancamiento de agua y en consecuencia hábitat de mosquitos, moscas, ratas, que llegan a producir enfermedades como el dengue y paludismo.

A partir de esta problemática surgen alternativas sustentables en el manejo y control de la llanta automotrices de desecho; como la de ser utilizadas como material de refuerzo en compositos. Razón por la cual, en el presente trabajo de investigación que lleva por nombre "Caracterización fisicoquímica de partículas de llanta de reciclaje irradiadas y su uso en materiales compuestos", se plantea como objetivo utilizar la radiación gamma para la modificación estructural de la llanta, realizar su caracterización fisicoquímica y posteriormente utilizarla como refuerzo en el concreto. Para lo cual, en una primera etapa se recolectaron llantas de desecho, se trituraron hasta obtener tamaños pequeños, y posteriormente se irradiaron con rayos gamma. Después se realizó su caracterización por espectroscopia infrarrojo, ultravioleta visible y Raman; microscopía electrónica de Barrido; Difracción de rayos X, DSC y TGA. En la siguiente etapa, se elaboraron probetas de concreto con cemento, grava, arena, agua y partículas de llanta de reciclaje; estas últimas a concentraciones de 1,3 y 5% en peso, con tamaño de partícula de 0.85 y 2.80 mm, y dosis de irradiación de 200, 250 y 300 kGy. El tiempo de curado del concreto fue de 7, 14 y 28 días. Por último, se realizó la prueba mecánica de resistencia a la compresión a las diferentes probetas, para obtener los valores de deformación unitaria en el punto con mayor resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad.

Los resultados muestran que las concentraciones de partículas sin irradiar e irradiadas a 1 y 3%, y con un tamaño de partícula de 2.80 mm son las que más favorecen la resistencia a la compresión; mientras que el módulo de elasticidad para partículas sin irradiar se ve favorecido con una concentración de 3% y un tamaño de 0.85 mm; para partículas irradiadas se ven favorecidas con una concentración de 5% y un tamaño de 2.80 mm. En cuanto el tiempo de curado, a los 28 días se muestra la mayor mejora en la resistencia a la compresión. Las aportaciones de este trabajo de investigación son la caracterización física y química de partículas de llantas automotrices de reciclaje antes y después de ser irradiadas con rayos gamma, así como su uso potencial como refuerzo mecánico en el concreto. Los conocimientos aportados sientan las bases del uso de este tipo de energía ionizante en la modificación de polímeros y su uso en las áreas de ciencias ambientales y de materiales.

OBJETIVO GENERAL

Caracterizar fisicoquímicamente partículas de llanta de reciclo irradiadas con rayos gamma.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

Realizar caracterización química de las partículas de llanta de reciclo irradiadas y no irradiadas por (Espectroscopia: infrarrojo, ultravioleta visible, Raman, Microscopia electrónica de Barrido, Difracción de rayos X, DSC y TGA).

Elaborar probetas de concreto (cemento, grava, arena, agua y partículas de llanta de reciclo) a diferentes concentraciones, tamaño de partícula, dosis de radiación y tiempo de curado.

Realizar prueba mecánica (resistencia a la compresión) de probetas a los 7, 14 y 28 días de curado para concreto con partículas de llanta a los distintos tamaños, concentración y dosis de irradiación.

Evaluar el comportamiento físico que presenta el material compuesto conforme a la variación de tamaño de partícula (0.85, 2.80 mm), concentración (1,3 y 5% en peso), tiempo de curado (7,14 y 28 días) y dosis de radiación (0, 200,250 y 300 kGy).

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Qué comportamiento presentarán las partículas de llanta de reciclaje irradiadas con rayos gamma en cuanto a las propiedades fisicoquímicas aplicado a materiales compuestos de construcción como el concreto?

INTRODUCCIÓN

Materiales como la puzolana, piedra caliza, arena sílice que tienen historia de miles de años son conocidos e introducidos más adelante con la elaboración del cemento Portland, un conocimiento que lleva al uso del concreto armado, pero es en 1970 cuando en pavimentos asfálticos se lleva a cabo la incorporación de llantas recicladas y es aquí donde la llanta de automóvil como polímero cobra importancia en ingeniería, química y ciencias ambientales.

Con un inicio en el descubrimiento de la vulcanización del hule fue posible crear un material sintético dotado de propiedades elásticas un tanto diferentes al hule natural y que cadenas de poliisopreno, polibutadieno, estireno-butadieno se unen covalentemente para crear un sistema rígido y resistente a cualquier fuerza que sea aplicada, basta con mencionar la industria textil, automovilística, de plásticos, etc., para reconocer la demanda que presenta el polímero de hule.

La problemática por el desecho de neumáticos (llantas) es muy grande ya que son desechados en lugares públicos y naturales y esto ha estado sucediendo desde muchos años atrás. El reciclaje es una alternativa importante en la reducción de materiales desechables, ya que es aprovechado a su máximo uso generando un nuevo material con una variedad de aplicaciones, por lo que el uso de partículas de llanta de reciclaje como un agregado en concreto genera un nuevo material que puede mejorar el concreto convencional. Y es la radiación gamma la herramienta adecuada para el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de polímeros y cerámicos, ofrece un panorama general del comportamiento de resistencia y elasticidad que presentará el concreto donde las altas dosis de irradiación permiten una reticulación y escisión de las cadenas del polímero.

Capítulo 1

Antecedentes

La elaboración de concreto tiene una historia de muchos años, desde aquellos materiales utilizados para producirlo, como la puzolana, una caliza con un alto contenido de arcilla, y el cemento Portland: una mezcla de grava, arena y agua (patentado por Joseph Aspdin en 1854). En el siglo XIX en Inglaterra en el concreto armado se usan fibras de paja para reforzarlo, este concreto se utilizaba en los adobes de arcilla para controlar la tensión por el secado y para reducir el agrietamiento. Posteriormente, el asbesto comenzó a ser utilizado en una matriz de cemento (Juárez, 2002). A finales de los años 1960, se evaluaron las propiedades de ingeniería de fibras naturales en el cemento y en la década de 1970, surgen investigaciones sobre la incorporación de *llantas reciclados* en pavimentos asfálticos; sin embargo para el concreto con fines estructurales, el uso de estos agregados es discutible, ya que se requiere una resistencia a la compresión mayor que el usado en los pavimentos.

Actualmente los materiales compuestos a base de matrices de cemento incorporan fibras, granos y laminillas para mejorar propiedades físicas y mecánicas, tales como la resistencia a la tensión, a la compresión, al agrietamiento, al impacto, a la abrasión y la tenacidad. Tras el inicio de la era de la sustentabilidad y cuidado del medio ambiente, así como estudios en el área de ciencia de materiales, el concreto sufre una modificación en cuanto a la composición física y química con la introducción de partículas de llanta como material de refuerzo.

1.1 Concreto

La palabra concreto proviene del latín *concretus*, que significa compuesto. Es una mezcla de cemento Portland, agua y agregados finos como la arena, y agregados gruesos como la grava, así como una pequeña cantidad de aire.

Por sus características físicas el concreto presenta una trabajabilidad, cohesividad, resistencia y durabilidad. La trabajabilidad y cohesividad son propiedades que se presentan en estado fresco del concreto, mientras que en el estado endurecido se

presentan la resistencia y durabilidad. El concreto es conocido por presentar propiedades como la resistencia a la flexión y a la tracción, módulo de elasticidad, capacidad de deformación por tracción, contracción por secado, coeficiente de expansión térmica, conductividad térmica, calor específico, resistencia al fuego y durabilidad.

La resistencia del concreto se ve alterada por diversos factores, como por ejemplo, el contenido de cemento, ya que a medida que aumente éste, la resistencia también aumentará; o también, la relación agua-cemento porque a diferentes tipos de agregado y cemento se pueden producir resistencias diferentes con la misma relación de agua-cemento. Las propiedades del agregado como la granulometría, la forma y textura de las partículas del agregado, la resistencia y rigidez de las partículas, así como la cantidad de cemento. La hidratación del concreto, la velocidad de endurecimiento llamado fraguado, la temperatura del concreto expuesto durante el proceso de curado y fraguado, y por último los parámetros de carga incluyendo los tipos de esfuerzo y velocidad de aplicación de carga.

El módulo de elasticidad incrementa cuando la resistencia del concreto es mayor. Los factores que afectan el módulo de elasticidad del concreto son el contenido de humedad, si es mayor esto llevará a un mayor módulo de elasticidad (López, 2013).

La calidad y mejoramiento en las propiedades mecánicas del concreto depende de la calidad de la pasta y de los agregados. Estos últimos constituyen del 60% al 75%, el cemento entre un 7% y 15%; el agua entre el 14% y el 21%.

1.2 Cemento Portland

Es un material inorgánico finamente pulverizado conformado por cal, sílice, alúmina y componentes de hierro. El *mortero* es una mezcla de pasta y agregado fino (arena), utilizada para pegar ladrillos, para hacer muros de mampostería, o en el recubrimiento de estos.

El cemento Portland se elabora a partir de materiales minerales calcáreos, tales como caliza, alúmina y sílice, que se encuentran como arcilla en la naturaleza. Su composición química consta de silicatos y aluminatos cálcicos anhidros e hidratados (Tabla 1).

Tabla 1. Abreviación de óxidos principales en el cemento Portland.

Compuesto	Fórmula	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	= C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	= C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	= C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	= C_4AF

La norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE presenta especificaciones importantes en relación al cemento, contempla los tipos de cemento, dos de los cuales son: a) CPO, cemento Portland Ordinario; y b) CPP, cemento puzolánico.

El clínter de cemento Portland es un material hidráulico formado por silicatos de calcio, óxido de hierro y aluminio que se obtiene por la cocción de los anteriores materiales hasta un de fusión parcial.

Los materiales puzolánicos son sustancias naturales o industriales de composición silícea o silico-aluminosa, estos no endurecen cuando se amasan con agua, pero en presencia de agua reaccionan con hidróxido de calcio disuelto $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formando compuestos de silicato y aluminato de calcio.

La resistencia del cemento se especifica con base en el uso que se le vaya a dar, con base en las necesidades de la construcción, así los números 20, 30 ó 40 corresponden a las resistencias mínimas en Newton por milímetro cuadrado (N/mm^2), y la letra R significa resistencia rápida a la compresión especificada en tres días. Así, los cementos se clasifican de acuerdo a la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Clasificación del cemento por su resistencia.

Clase	Resistencia a la compresión (N/mm ²)		
	Rápida (3 días)	Normal (28 días)	
	Mínima	Mínima	Máxima
20	-	20	40
30	-	30	50
30 R	20	30	50
40	-	40	-
40 R	30	40	-

1.2.2 Etapas de hidratación del cemento

Periodo de pre-inducción: Cemento y agua entran en contacto, se produce una disolución de C₃S y C₃A, también de los sulfatos. Especies iónicas pasan a la fase líquida, se produce una mayor concentración de iones AlO₄⁵⁻, SiO₄⁴⁻ y Ca²⁺ e iones SO₄²⁻, provenientes del yeso y sulfatos alcalinos. En los primeros minutos se produce una hidratación inicial del C₃S, también la formación de etringita C₆As₃H₃₂, se desprende una cantidad de calor.

Periodo de inducción: La velocidad de hidratación disminuye. La concentración de iones Ca²⁺ en fase líquida alcanza una sobresaturación, da inicio la nucleación del gel C-S-H y precipitación de portlandita Ca (OH)₂. Los iones SO₄²⁻ permanecen constantes.

Periodo de aceleración: La hidratación se acelera. Se forman grandes cantidades de gel C-S-H y la portlandita continúa precipitando, produciendo un descenso en la concentración de iones Ca²⁺ provocando una aceleración en la disolución del C₃S y un aumento de calor desprendido. Disminuye la concentración de iones SO₄²⁻ por la formación de etringita. Hay una mayor formación de productos de reacción.

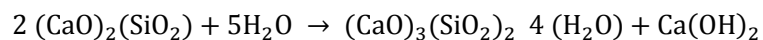
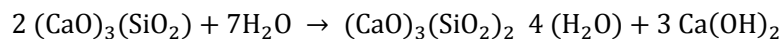
Periodo de desaceleración: Disminución de las velocidades de reacción, la etringita puede transformarse en monosulfoaluminato cálcico hidratado, por el descenso de iones sulfato en disolución. En este punto la hidratación del C₂S puede ser significativa. Partículas

anhidras de silicatos se encuentran rodeados por una densa capa de hidratos, se produce en esta etapa la condensación y densificación del gel C-S-H. (Bishop, 2001).

1.2.3 Estructura del gel C-S-H: producto de la hidratación del cemento Portland

El gel C-S-H se forma en la hidratación de los silicatos di y tricálcicos (C_3S and C_2S , respectivamente) están formados alrededor del 80% en peso de cemento Portland, es un compuesto amorfo, elevada superficie específica y con una relación Ca/Si variable entre 1,2 y 2,1.

El C_3S es la fase más importante en el cemento para el desarrollo de fuerza durante el primer mes, por otro lado el C_2S reacciona más lentamente y contribuye a la resistencia a largo plazo del cemento. Ambas fases tricálcicas reaccionan con agua para formar hidróxido de calcio y un gel rígido hidratado de silicato cálcico, C-S-H.



La composición química y estructura molecular del silicato de calcio hidratado (C-S-H) se piensa que afecta muchas propiedades del concreto, es la fase primaria de enlace (Hunnicut, 2013).

Según el modelo propuesto por Taylor (Taylor, 1986), el gel C-S-H tiene una estructura laminar desordenada, las diferentes capas tienen parecido a las estructuras derivadas de 1,4 nm tobermorita ($Ca_5Si_6O_{26}H_{18}$) o de jennita ($Ca_9Si_6O_{32}H_{22}$). En estas estructuras las cadenas de silicatos son *dreierketten*, es decir se repiten a intervalos de tres tetraedros. En la estructura de la 1,4 nm tobermorita dos de los tetraedros comparten átomos de oxígeno con la lámina central de CaO, pero el tercer tetraedro no está unido a esta lámina central (Puertas, et.al, 2013) (Figura 1).

La diferencia entre la tobermorita con la jennita es que esta última sustituye un tetraedro por grupos OH⁻, esto provoca una ondulación de las capas de Ca-O, donde los átomos de oxígeno son compartidos con los tetraedros, entre los tetraedros (Chen, et.al, 2004).

Cada cadena de silicatos está constituida por $(3n-1)$ tetraedros, donde n es un número de unidades tetraédricas individuales.

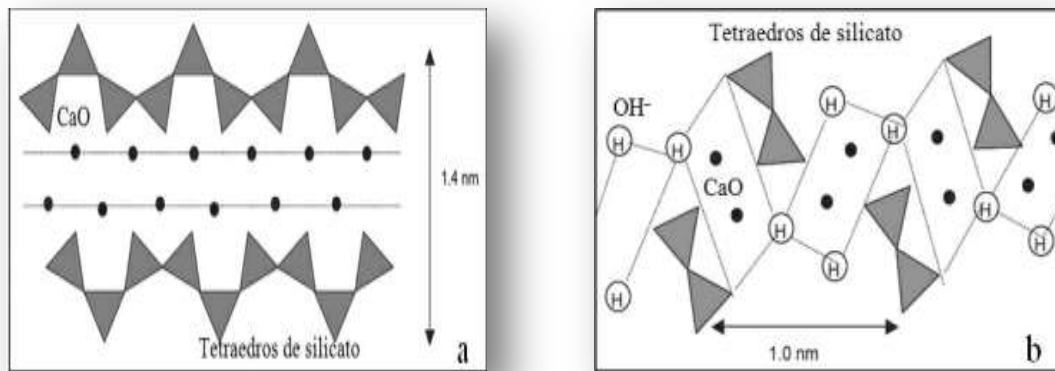


Fig.1. a) estructura de la 1,4 nm tobermorita; b) estructura de la jennita (Puertas, et.al. 2013).

Richardson con colaboradores propuso un modelo de gel C-S-H, parecido al de Taylor, sin embargo existe una diferencia con la sustitución de cationes trivalentes como Al^{3+} sustituyendo al Si^{4+} en tetraedros puente, donde el balance de cargas se logra con la incorporación de cationes alcalinos o iones Ca^{+2} entre las capas (Figura 1.1) (Richardson, et.al, 1993).

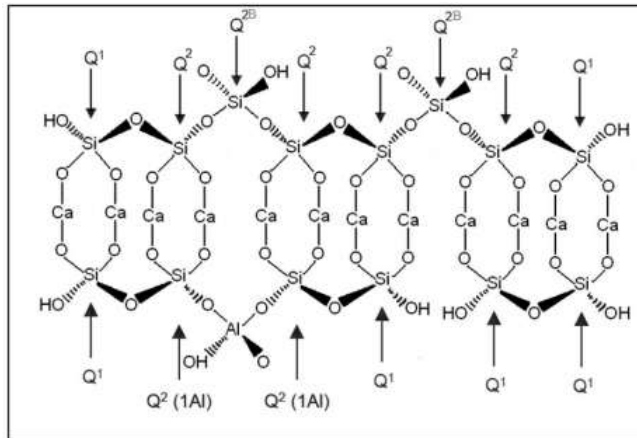


Fig.1.1. Estructura del gel C-S-H (Puertas .F.et, al. 2013).

1.3 Agregados

Los agregados conforman entre el 70% y el 80% del volumen del concreto, estos se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los finos son arenas cuyas partículas miden menos de $\frac{1}{4}$ de pulgada. Generalmente ocupan del 60% a 75% en volumen de concreto (70% a 85 % en peso) cuyo tamaño oscila de 0.075 a 4.75 mm, son resultado de la desintegración de rocas provenientes de ríos, volcanes, suelos, etc. La sílice es el constituyente principal de la arena, y en menor medida contenidos de alúmina, óxidos de hierro, potasio y carbonato cálcico. Las arenas no tienen nitrógeno, las concentraciones de fósforo y potasio son generalmente bajas (Chan, et.al, 2003).

Los agregados gruesos tienen un tamaño mayor a $\frac{1}{4}$ de pulgada, se emplean comúnmente de 19 mm o 25 mm; son básicamente grava, piedras estrujadas y escoria de alto horno molida y granulada. Su extracción suele ser de depósitos naturales, de minas, ríos, etc., sin embargo se pueden obtener a partir de procesos industriales como la grava triturada que proviene de rocas de cantera. La composición de la grava consta de dos grupos principales de rocas: ígneas y sedimentarias. Las rocas ígneas están formadas por óxidos pero principalmente por SiO_2 entre 40% y 75% en peso. El Al_2O_3 se encuentra entre un 10% y 20% en peso. Por otra parte las rocas sedimentarias están compuestas de SiO_2 , FeO , Fe_2O_3 y CaO .

Los agregados pueden reaccionar con los álcalis de cemento, esto sucede entre el SiO_2 y los hidróxidos alcalinos de la pasta de cemento (Na_2O y K_2O), produciendo un gel hinchable a medida que absorbe agua (León, et. al, 2010).

La *granulometría* permite conocer la distribución de los tamaños de las partículas, dividiendo una muestra de agregados en fracciones de igual tamaño. En cuanto a su tamaño cuando los agregados son muy gruesos, pueden producir mezclas rígidas, mientras que los que presentan tamaños óptimos producirán mezclas maleables. Otro parámetro importante es la absorción de agua, que permite una diferencia en la manejabilidad de la mezcla. Una buena consistencia y manejabilidad se adquiere con índices bajos de absorción y un buen coeficiente de forma, donde las partículas tienden a ser redondas (Rodríguez, 2013).

En un trabajo de investigación se encontró que concretos elaborados con agregados triturados (basalto y caliza), resistieron más los que utilizaron agregados gruesos. El esfuerzo de compresión a los 28 días, fue mayor en un 10% y 20% para los concretos con agregados triturados (Ozturan y Cecen, 1997). El efecto del tamaño del agregado en la resistencia mecánica, es bien conocida, mientras disminuye el tamaño máximo de agregado (TMA), la resistencia decrece, fenómeno que se ha observado para gravas de 9.5, 19, 37.5 y 75 mm.

El agua representa aproximadamente entre el 10 y 25 % del volumen del concreto, cumple con funciones como la hidratación del cemento y hacer la mezcla manejable. La cantidad de agua que requiere el cemento para su hidratación es entre el 25 y 40 % de la masa del cemento. El agua es el componente necesario para llevar a cabo las reacciones entre el cementante del concreto, debe cumplir los requisitos establecidos en la norma NCMT-202-003/02, de no contener grasas o aceites, ni 600 ppm de carbonatos disueltos, 3000-3500 ppm de sulfatos o 100-150 ppm de magnesio (Alexander, 1996).

1.4 Llanta automotriz

En 1844 Goodyear patentó la vulcanización del hule; proceso que definió las propiedades químicas del hule, y luego con la introducción del automóvil en 1910, se incrementó la producción de llantas. Los materiales que conforman la estructura de una llanta automotriz, se muestran en la figura 1.2.



Fig.1.2. Partes de una llanta de automóvil.

Hombro: Está compuesto por la capa más gruesa de hule de toda la llanta, disipa rápida y fácilmente el calor que se acumula en el interior de la llanta.

Flanco: Protege la carcasa y aumenta la estabilidad durante la marcha gracias a su extensión flexible y a sus movimientos de contracción.

Carcasa: Es la armadura de la llanta, absorbe la presión de aire interna de la llanta, el peso y los impactos.

Aislamiento interior: Consiste en una capa de hule (butilo o poliisopreno) con propiedades herméticas, su función es conservar el aire dentro de la llanta.

Talón: Se compone de varias partes entre las que figuran el alambre del talón, el relleno, el hule y la aleta, así la llanta queda levemente apretada.

Protector o correa: Es una capa de tejido con la finalidad de proteger la carcasa, absorbe los impactos externos, el protector evita la separación de la capa de hule y carcasa.

1.4.1 Composición de llantas

Las llantas están compuestas principalmente por tres materiales: hule (natural o sintético), un encordado de acero y fibras textiles. El hule está formado por poliisopreno sintético, poli butadieno y estireno-butadieno (Tabla 1.2 y 1.3)

Tabla 1.2. Composición de llantas (Reséndiz, 2007).

Componente	De camiones (%)	De Automóviles (%)
Hule natural	27	14
Hule sintético	14	27
Negro de humo	18	28
Acero	15	15
Rellenos	16	16

Tabla 1.3. Materiales que componen los diferentes tipos de llanta (Barrera, et. al, 2015).

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

1.4.2 Hule natural (NR)

Es un homopolímero natural que se obtiene como una emulsión lechosa de algunas plantas particularmente la *Hevea brasiliensis*. El material se recolecta y se deja secar o se coagula con ácido fórmico. Aproximadamente de 60 litros de látex se obtienen 12 kg de hule.

El hule natural está conformado por un monómero de isopreno (C_5H_8), alrededor del 94% de moléculas de isopreno y un 6% de impurezas (proteínas, carbohidratos, fosfolípidos, metales, sales y óxidos). El hule natural presenta una estructura amorfa, comportamiento elástico a temperatura ambiente, fluye por encima de los 60°C.

1.4.3 Hule sintético

En sus inicios se obtuvo como un líquido con la fórmula molecular C_5H_8 por destilación del hule, aquel líquido fue llamado "isopreno", pero al calentarlo con ácido clorhídrico produjo un hule polimerizado. Su producción comienza con la refinación de petróleo, aceite y otros hidrocarburos con nafta como uno de los productos resultantes. La nafta después es agregada junto a gas natural para la formación de monómeros. Estos son polimerizados por procesos de catálisis y vapor para formación de cadenas de polímeros los cuales finalmente resultan sustancias gomosas, después estas sustancias son procesadas para productos de hule por un proceso de vulcanización.

1.4.4 Poli butadieno (BR)

Fue uno de los primeros tipos de hules sintéticos, su mayor uso es en llantas. Es un homopolímero de 1,3-butadieno, con fórmula (C_4H_6), los cuatro átomos se encuentran de forma lineal con dos dobles enlaces. El poli butadieno presenta dos configuraciones que son el cis y el trans. La configuración cis se produce a partir del uso de metales de transición, se forman gomas de butadieno espacialmente regulares, donde los grupos unidos al doble enlace carbono-carbono se encuentran del mismo lado (configuración cis).

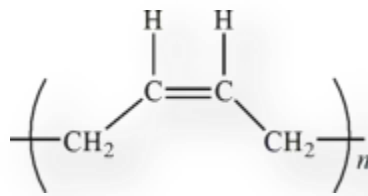


Fig.1.3. 1,4-cis poli butadieno

Utilizando el catalizador Litio-alquilo se forma un polímero con un 40% cis, 50% trans y 10% de vinilo, en esta reacción se genera un anión al final de la cadena en crecimiento, esto puede reaccionar con grupos funcionales para formar una variedad de poli butadienos modificados. El vinilo que se produce en la reacción lleva a cabo un aumento en la temperatura de transición vítrea (T_g) del poli butadieno, haciendo que esta molécula sea más rígida. También el vinilo tiende a entrecruzarse en condiciones altas de temperatura dándole menos estabilidad térmica al poli butadieno.

También existe la configuración del poli butadieno de alto contenido trans, es un material cristalino, se produce a partir de catalizadores metálicos de transición (La, Nd y Ni), a partir de esta reacción pueden obtenerse más de un 90% de transpolibutadieno.

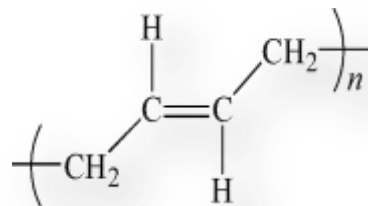


Fig.1.4. 1,4-trans poli butadieno

1.4.5 Estireno-butadieno (SBR)

Es un copolímero formado por la polimerización de la mezcla de dos o más monómeros de estireno y 1,3-butadieno, como se muestra en la figura 1.5. Es una mezcla de 75% butadieno ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$) y 25% de estireno ($\text{CH}_2=\text{CHC}_6\text{H}_5$).

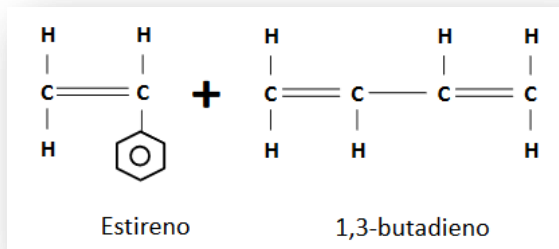


Fig.1.5. Monómero estireno, 1,3-butadieno.

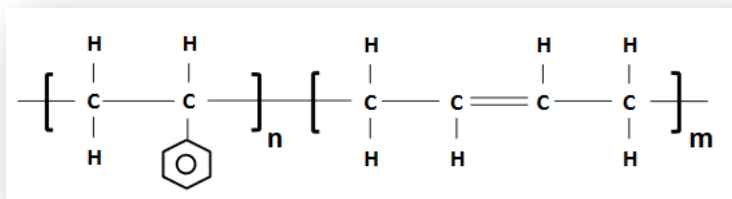


Fig.1.6. Subunidad polimérica de SBR (Juárez, 2013).

El SBR puede elaborarse mediante dos técnicas de polimerización: en solución (S-SBR) o en emulsión (E-SBR). En la tabla 1.4 se muestran las diferencias de los dos tipos de SBR.

Tabla. 1.4. Diferencias entre la polimerización SBR solución y SBR emulsión.

	SBR Solución	SBR Emulsión
Estireno (%)	18-25	23-40
Vinil (%)	10-80	15-20
Distribución de estireno	En bloque o al azar	Al azar
Peso Molecular	Controlado	No controlado
Distribución de peso molecular	Estrecha	Ancha
Ramificación de cadena	Leve	Apreciable

Los polímeros derivados del estireno-butadieno son hules sintéticos con mayor producción mundial, su principal aplicación es la fabricación de llantas. Su resistencia a la tracción después de mezclado con negro de humo y vulcanizado es menor que la del hule natural, sin embargo presenta una elongación de hasta el 1000%. También presenta una

mayor abrasión y resistencia superficial, tiene mejor resistencia a los disolventes y a la intemperie en comparación con el hule natural.

Entre las propiedades mecánicas que presenta el SBR se muestra una excelente resistencia a la abrasión, moderada resistencia al desgarre, moderada resistencia a la flexión, en propiedades físicas presentan una baja resistencia a la intemperie (oxidación, ozono, luz solar), excelente resistencia eléctrica, baja permeabilidad a los gases, y en propiedades químicas, buena resistencia al agua pero poca al vapor de agua, poca resistencia a ácidos diluidos y baja resistencia a los aceites (vegetal y animal).

1.4.6 Poliisopreno (IR)

La cadena del isopreno es perfectamente regular, el cual cada cuatro átomos de carbono tiene un grupo metilo CH_3 como grupo lateral, también posee un doble enlace, importante ya que le brinda una reactividad química a la molécula con el azufre y otros agentes durante la vulcanización.

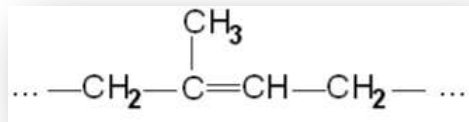


Fig.1.7. Monómero de isopreno.

En forma natural el monómero de isopreno polimerizado tiene dos arreglos isoméricos, la primer variante del hule natural proveniente del árbol *Hevea brasiliensis* presenta una estructura poli-cis-1,4-isopreno, donde los enlaces sencillos se encuentran del mismo lado del enlace doble. La otra variante natural del isopreno es la gutta percha o balata, proviene del árbol *Palaquium gutta*, esta posee una estructura poli-trans-1,4-isopreno donde los enlaces simples se encuentran posicionados en lados opuestos respecto al doble enlace.

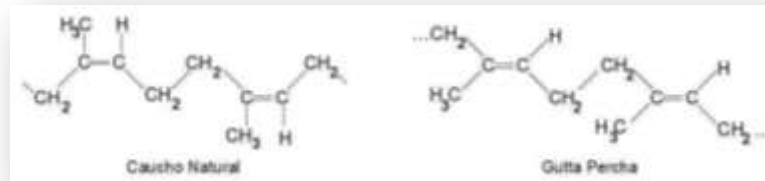


Fig. 1.8. Estructuras poli-cis-1,4-isopreno (hule natural) y poli-trans-1,4-isopreno (Gutta Percha).

1.5 Vulcanización del hule

La *vulcanización* (curado, entrecruzamiento), es un proceso químico en el cual las moléculas de hule son conectadas en forma de red tridimensional por inserción de enlaces entrecruzados (Coran, 1994). Este proceso de cruzamiento provee al hule la habilidad de regresar a su estado original después de haber sido comprimido o tensionado. Eso también ofrece algunas propiedades al material como dureza o resistencia química, tenacidad bajo tensión estática o dinámica, resistencia a la abrasión e impermeabilidad al aire y al agua.

La parte del vulcanizado también son enlaces hidrógeno, polares o fuerzas dispersas. El resto de los ingredientes en el hule están en forma original, disperso o soluble. Para la formación de entrecruzamientos químicos entre las macromoléculas de hule son usados diferentes sustancias químicas (sulfuro, peróxidos, óxidos metálicos, resinas, quinonas y otros) que reaccionan con grupos funcionales del hule y crean entrecruzamientos entre ellos.

El número de enlaces cruzados en las moléculas de hule (que se caracterizan por la densidad de reticulación) y su estructura química dependen principalmente del contenido y la actividad del agente de vulcanización, la temperatura y el tiempo de vulcanización (Matador, 2007).

A mayor densidad de reticulación la resistencia a la tracción no aumenta proporcionalmente. La mayoría de los vulcanizados de origen sintético tienen una resistencia más baja que los NR (hule natural), debido a que no pueden cristalizar sus macromoléculas por diferentes tipos de unidades estructurales (cis, trans, 1.4, 1.2) o más unidades monoméricas (butadieno, estireno, acrilonitrilo y otros). La dureza del vulcanizado se debe al aumento de tiempo de vulcanización al igual que su densidad de reticulación.

1.6 Reciclaje de llantas automotrices

El reciclaje es un proceso fisicoquímico o mecánico que consiste en someter a una materia o un producto ya utilizado a un ciclo de tratamiento total o parcial para obtener una materia prima o un nuevo producto, o la obtención de materias primas a partir de desechos, introduciéndolos de nuevo en el ciclo de vida y se produce ante la perspectiva del agotamiento de recursos naturales, macro económico y para eliminar de forma eficaz los desechos”.

Existen materiales de reciclaje los cuales son: aluminio, vidrio, baterías, cemento, papel, cartón, plástico, tetra pak, computadoras, llantas, entre otros; sin embargo actualmente se tiene una pequeña consideración en el reciclaje de llantas. En México se reciclan dos millones (5%), de los 40 millones de llantas que se generan anualmente.

En México la cultura del reciclaje es limitada, en general asociamos el reciclaje a una pequeña cantidad de productos: papel y cartón, aluminio y metales, vidrio y plásticos. Un alto porcentaje de los residuos se manejan de manera ineficiente, ya que en general los desechos son entregados sin separar pese a que las leyes lo exigen. Sin embargo existen pequeñas empresas en México dedicadas a este tipo de actividades, en el manejo y reciclaje de llantas, siendo una opción atractiva con una buena oportunidad de crecimiento.

Etapas en el proceso de reciclaje de llantas:

Destalonamiento: En esta etapa remueven los alambres de acero armónico.

Trituración: Es la reducción volumétrica de la llanta entera a tamaños pequeños, que varían entre 20 y 100 mm.

Granulación primaria: Es la reducción volumétrica de los trozos de llantas en tamaños de 20 mm. Si el material granulado no contiene material textil, se separan por tamaños en una criba con tres diferentes orificios (diámetros de 1 a 17 mm). Entre más pequeño y puro se logre obtener el grano, mayor será su valor en el mercado.



Granuladores secundarios



Criba rotativa

Figuras 1.9 y 1.10. Obtención de partículas con diámetro de 1 a 17 mm (Sosa, 2015).

Granulación secundaria: Si el material granulado contiene material textil, se conduce a una sucesiva fase de granulación para separar la tela de la goma, también se le llama refinación.

Desmetalizado (separación del acero): Se emplea para remover partículas ferromagnéticas de los demás materiales, se remueve el 99% del acero “armónico” por medio de un separador magnético.

Durante el proceso de granulado se produce una fracción de polvo de tela y de hules, por lo que estas partículas deben ser aspiradas por sistemas aspiración de polvos para al final lograr la separación de las llantas en cuatro componentes.



Figuras 1.11. Productos de reciclado de llantas

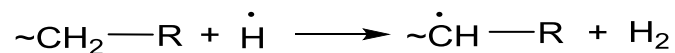
1.7 Radiación gamma. Mecanismo de reacción

Una incidencia de irradiación en materiales específicamente moléculas poliméricas genera un efecto estructural como reticulación y formación de radicales. La irradiación produce una escisión de la cadena y una ruptura aleatoria de enlaces, lo cual reduce el peso molecular del polímero y el entrecruzamiento de moléculas poliméricas, para así llegar a la formación de largas redes. En el proceso de escisión puede aparecer un bajo peso molecular, gas y enlaces insaturados. Los efectos del entrecruzamiento generalmente llegan a incrementar la resistencia a la tensión, mientras que la elongación decrece y se vuelve más frágil con incremento de dosis de radiación.

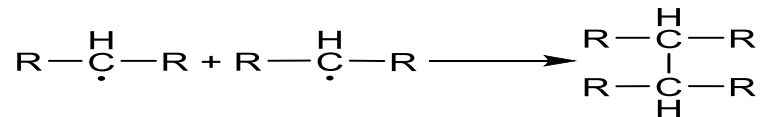
Las fuentes de radiación generalmente son isótopos naturales o artificiales. Las fuentes de radiación gamma son de cobalto-60, el cual emite dos rayos gamma con energías de 1.17 y 1.33 MeV, su tiempo de vida media es generalmente de 5 años.

Los cambios químicos que presentan los polímeros irradiados con rayos gamma están en la *formación de radicales libres*, esto surge a partir de una radiación ionizante de un polímero que conduce a la disociación de enlaces covalentes. Esto lleva al cruce de electrones del enlace a uno de las partes disociadas de la molécula mientras que la otra parte es el radical libre activo. Las interacciones por radicales libres se muestran a continuación:

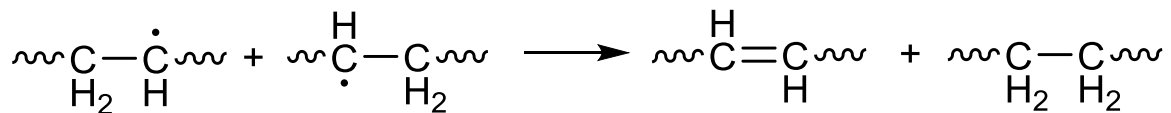
- 1) **Abstracción:** es el paso después de la formación del radical libre, donde los hidrógenos formados toman un hidrógeno de alguna otra molécula polimérica para la formación de hidrógeno molecular y un nuevo radical.



- 2) **Recombinación:** la formación de macro radicales libres conduce a la formación de cruzamientos.



- 3) **Desproporción:** dos radicales se combinan para dar dos estables moléculas, una es más insaturada que la otra.



Formación de radicales libres y entrecruzamiento son los más importantes cambios que la radiación conduce a un polímero. La separación o escisión de la cadena genera radicales libres en la cadena de polímero principal y a lado de las cadenas mientras que el entrecruzamiento es una formación de enlaces intermoleculares, se agregan otros como la formación de gas (formación de gases tales como H₂, CH₄, CO), cambios en la instauración o ciclación (presencia aire u oxígeno).

El entrecruzamiento transforma un polímero lineal a una molécula tridimensional, incrementando el peso molecular, baja la solubilidad en solventes orgánicos y mejora las propiedades mecánicas.

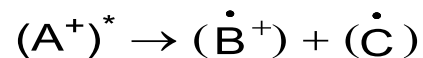
En el mecanismo de radiación suceden procesos que logran un cambio químico y físico a altas energías de irradiación. El primer proceso de ionización es visto como una simple reacción de formación de iones positivos y una alta energía electrónica.



El segundo proceso como reacción primaria es el proceso de excitación conducido a la formación de especies excitadas.

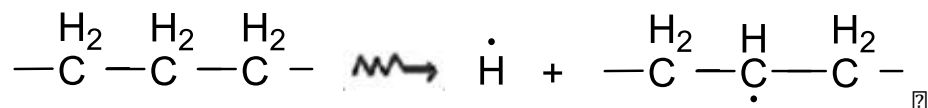


Los electrones del primer proceso son suficientes para llevar a cabo procesos primarios como más ionización, excitación y neutralización de positivos. Cuando los electrones logran el equilibrio térmico, la segunda reacción de sus iones excitados es su disociación en un radical catión (B^+) y radical (C).

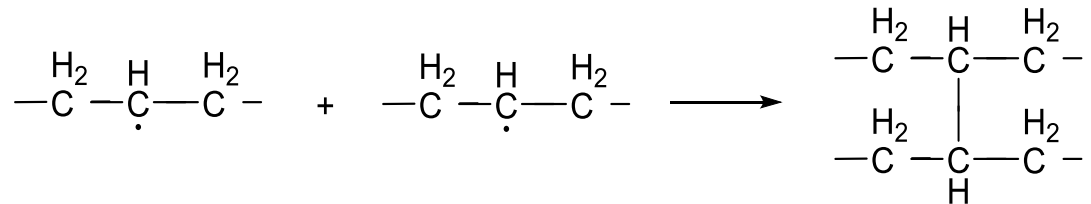


Más reacciones pueden suceder de las especies formadas como su disociación en iones secundarios, productos moleculares o radicales libres.

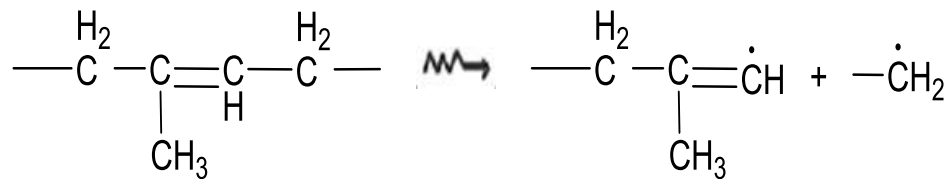
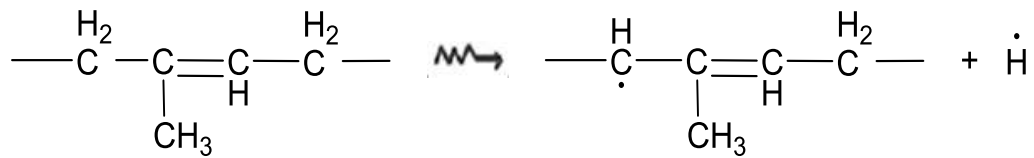
Para un polímero sometido a irradiación se establece que los iones y especies excitadas formadas son transformados en macromoléculas libres. Un ejemplo es el polietileno irradiado donde los átomos de hidrógeno son formados por disociación de un enlace C-H. El átomo de hidrógeno del radical alquilo por la abstracción de hidrógeno de la macromolécula se muestra a continuación.



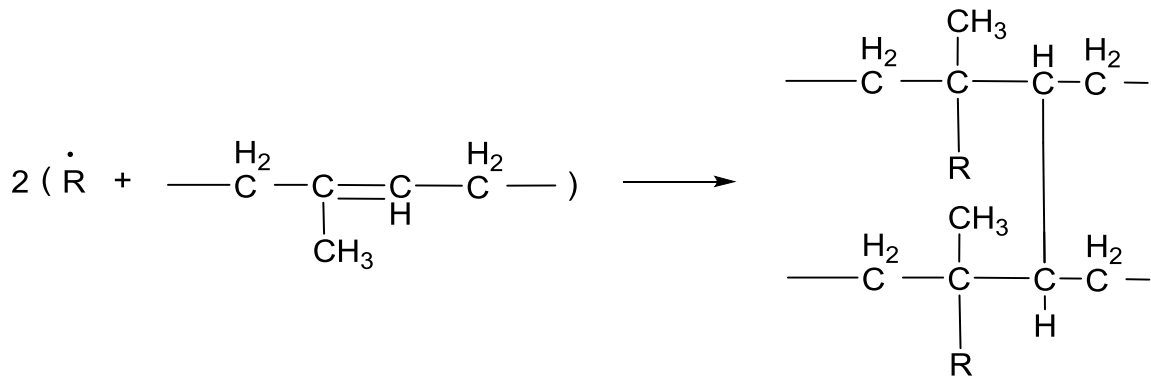
El entrecruzamiento intermolecular puede ser formado por la combinación de dos radicales alquilo.



Polímeros insaturados como poliisopreno, hule natural pueden presentar complicaciones ya que pueden suceder muchos tipos de reacción que ocurren al mismo tiempo tal como la formación de radicales alquilo e hidrógeno o escisión de la principal cadena de polímero llevando a la formación de radicales.

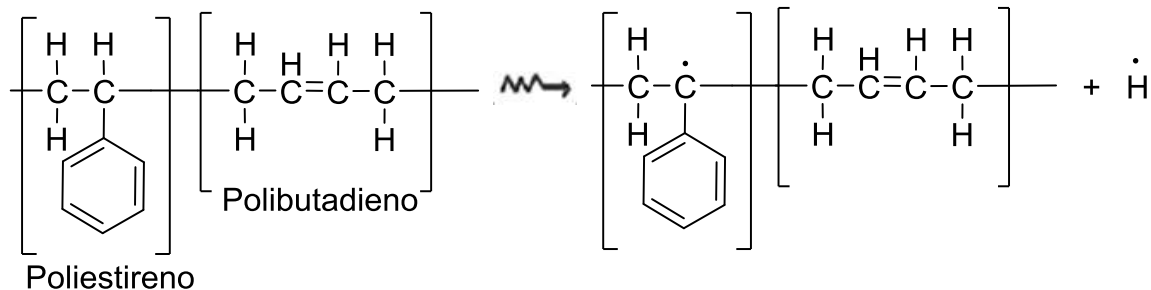


Después los radicales libres formados podrían atacar el doble enlace conduciendo a un proceso de entrecruzamiento.



En la irradiación de materiales poliméricos como por ejemplo el hule, suceden procesos como la formación de radicales libres y entrecruzamiento de las cadenas. (Moustafa, 2011) indica que el proceso de entrecruzamiento domina para dosis de hasta 150 kGy, el proceso de escisión se presenta para dosis mayores de 150 kGy, surge una alteración en la orientación de la cadena de macromoléculas debido al entrecruzamiento extendido, así como una contribución en la disminución de la resistencia a la tracción para dosis superiores a 150 kGy.

La región más susceptible a la radiación es el carbono terciario en la cadena principal de la macromolécula que conduce a la formación de átomos de hidrógeno y un radical bencilo. El radical bencilo sufre una estabilización resonante con el anillo fenil del monómero estireno. Ese radical libre reacciona con alguna otra molécula formando un enlace covalente, el entrecruzamiento entre dos macromoléculas adyacentes.



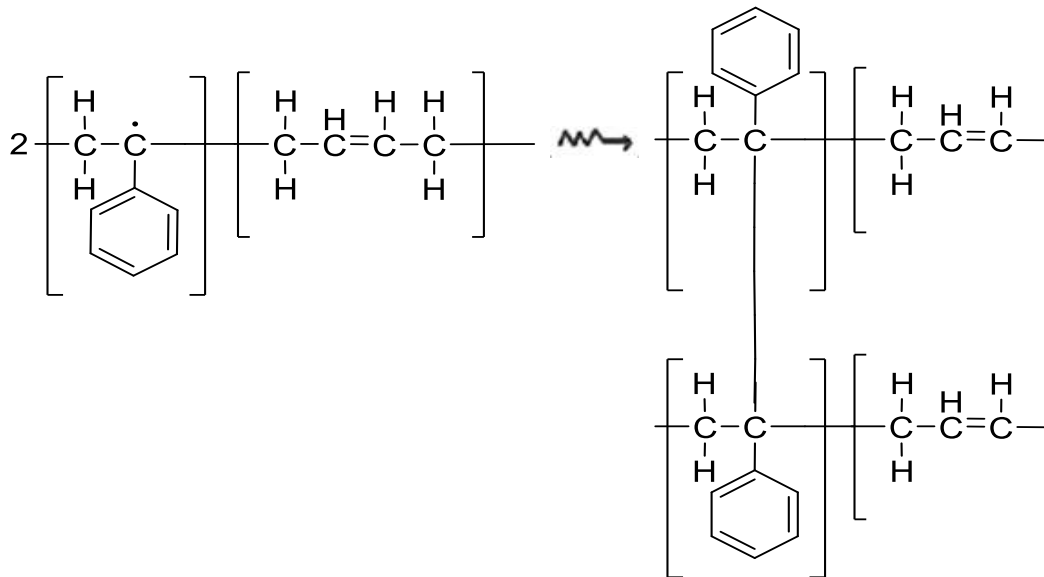


Fig.1.12. Reacción del efecto de la radiación en SBR.

1.8 Estudios de llantas automotrices utilizadas en el concreto.

Son estudiados, la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, resistencia a la tracción, resistencia al corte, entre otros. Estudios muestran que la resistencia a la compresión se ve reducida progresivamente con el aumento en la cantidad de hule (Valadares, et.al, 2012; Oviedo, et. al, 2008), que varía de 5% a 15% (Aiello y Leuzzi, 2010). Estudios de (Schultz, et.al, 2004), muestran que la resistencia a la flexión del concreto disminuye con el aumento de hule añadido (de 3.5% a 5%).

Tabla.1.5. Resistencia a la flexión de concreto con hule.

	Sin hule	3.5 % de hule	5 % de hule
Resistencia a la flexión, MPa	6.1	4.4	5.38

El módulo de elasticidad presenta las mismas tendencias que para los ensayos de resistencia a la compresión. (Bravo y Brito, 2011) realizaron estudios relacionados con el porcentaje de absorción del concreto el cual es directamente proporcional al aumento del

porcentaje de hule, esto se explica a la poca adherencia entre la pasta de cemento y el agregado de hule permitiendo mayores vías de acceso del agua y por tanto mayor absorción de agua, para el aumento del 5,10 y 15% con agregado de hule fino la absorción aumenta.

(Albano, et.al, 2008) realizaron un estudio relacionado al concreto con partículas de llanta de desecho donde la resistencia a la compresión (MPa) para las probetas cilíndricas con un tamaño de llanta menor a 1.19 mm a una concentración de 5% es *mayor* que el de aquel tamaño de llanta mayor a 1.19 mm con la misma concentración, sin embargo para la resistencia a la tracción (MPa) sucede lo contrario siendo el tamaño mayor a 1.19 mm el que presenta un comportamiento *ligeramente mayor* al de tamaño menor a 1.19 mm.

Este hecho se debe a que las partículas de hule actúan como poros en la mezcla, las partículas de menor tamaño, por ejemplo, se colocan en los intersticios o huecos dejados por partículas grandes, presentándose así menos espacios vacíos o huecos en la mezcla en el estado fresco, influyendo en la trabajabilidad y resistencia mecánica, mejorando en forma significativa las propiedades de resistencia a la compresión y a la tracción.

Capítulo 2

Materiales y metodología

2.1 Proceso de obtención de partículas de hule de llanta

El proceso de obtención de partículas de hule de llanta a dos diferentes tamaños 2.80 mm (7 Mesh) y 0.85 mm (20 Mesh) se describe a continuación:

1. Destalonamiento. Se removieron los alambres de acero “armónico”.
2. Trituración. Se redujo la llanta entera a trozos pequeños, de entre 20 mm y 100 mm.
3. Granulación primaria. Se obtuvieron partículas tamaño de 20 mm. Las partículas de llanta sin impurezas con un tamaño de 20 mm se separaron en una criba a diferentes tamaños (1-17 mm).
4. Granulación secundaria. Ya molidos los granos se separaron en una criba de tres diferentes tamaños, estos oscilan entre 0.5 a 3 mm.
5. Se aspiran los restos pequeños de material textil que se generaron durante el proceso de granulación con un sistema de aspiración (Sosa, 2015).
6. Se colocaron en bolsas de plástico de acuerdo a las tres diferentes dosis de radiación (200, 250 y 300 kGy), y los dos diferentes tamaños de partícula 2.80 mm (7 Mesh) y 0.85 mm (20 Mesh).

2.2 Irradiación de partículas de hule de llanta

Las partículas de llanta de reciclaje a dos diferentes tamaños 2.80 mm (7 Mesh) y 0.85 mm (20 Mesh), fueron irradiadas con rayos gamma a una tasa de dosis de 1.1 kGy/h a temperatura ambiente a (25 °C); en un irradiador Transelektro LGI-01 con fuentes de ⁶⁰Co, manufacturado por IZOTOP Institute of Isotopes Co. Ltd., Budapest Hungría; localizado en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). Las muestras fueron irradiadas hasta alcanzar dosis de 200, 250 y 300 kGy. Posteriormente las muestras fueron retiradas de la exposición, guardadas y rotuladas en bolsas de plástico para evitar la contaminación del material.

2.3 Técnicas de caracterización

2.3.1 Espectroscopia Infrarroja

Se utilizó un espectrómetro FT-IR SHIMADZU, modelo IR Prestige-21, en un intervalo de 500-4000 cm^{-1} , del Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA) localizado en el campus el Rosedal de la Facultad de Química de la UAEM. Para obtención de espectro de infrarrojo, primero se encendió el equipo y calibro con un material de referencia certificado como el poliestireno. Una pequeña porción (punta de la espátula) de las partículas del hule de llanta se colocaron en porta muestras del espectrómetro, el espectro de cada muestra se corrió bajo diferentes condiciones hasta la obtención del mejor espectro, esto se realizó para las partículas con dosis de radiación (0, 200, 250 y 300 kGy).

2.3.2 Espectroscopia ultravioleta-visible

Se realizó un análisis por espectroscopia ultravioleta-visible (UV-vis), de las partículas de hule de llanta, con el equipo Perkin Elmer UV/Vis Spectrometer Lambda 35 (Fig.2) con esfera de integración para sólidos, localizado en el Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS) UAEM-UNAM. La muestra fue manipulada con ayuda de una espátula, esta fue transportada a un dispositivo de vidrio porta muestras diseñado por el mismo laboratorio para lograr una adecuada posición en el equipo. Se realizaron pruebas para muestras del hule de llanta de las cuatro diferentes dosis de radiación (0, 200, 250 y 300 kGy) en un intervalo de 200-1200 cm^{-1} .



Fig. 2. Espectrómetro uv-visible, con esfera de integración.

2.3.3 Espectroscopia Raman

Se hizo un análisis mediante espectroscopia de dispersión Raman, utilizando un equipo Raman WITEC acoplado a un microscopio con focal con una longitud de onda de excitación de 532 nm, en un rango de 3000-100 cm^{-1} . Las partículas de hule de llanta fueron analizadas en forma de polvo con la cantidad necesaria de material para la obtención de un mejor espectro a cuatro diferentes dosis de radiación.

2.3.4 Difracción de rayos X

Para realizar este análisis se necesitó de partículas en forma de polvo de las muestras de hule de llanta a (0, 200, 250 y 300 kGy), estas se almacenaron en un vial rotuladas con sus correspondiente nombre, posteriormente se realizó su análisis colocando las partículas de hule de llanta en la celda del equipo de DRX de polvos Bruker D8 Advance con geometría Bragg-Bretano, radiación de $\text{CuK}\alpha$, y detector Linxeye (Fig.2.1). El método utilizado fue el método Fe-pilc A80 de la base de datos del equipo, un paso de 0.04° un haz de 35 kV con intensidad de 30 mA.



Fig.2.1. Difractómetro de rayos X de polvos

2.3.5 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

Para un análisis morfológico y topológico superficial del hule de llanta se empleó un Microscopio Electrónico de Barrido con EDS, marca JEOL modelo JSM-6510LV, resolución máxima de 5.0 nm con voltaje de aceleración de 1 a 30 kV (Fig.2.2). La preparación de la muestra consistió en tener el material seco y limpio evitando cualquier impureza orgánica en la superficie. Se utilizó una cámara de sputtering marca DENTON Desk IV con recubridor de oro y de grafito, sistema de vacío con aire de 30 a 1000 mtorr, con capacidad para 8 muestras, el propósito del recubrimiento consistió en hacer conductor el material, esto para ser más fácil y posible la observación microscópica del material, esta se colocó en el soporte de superficie circular lugar donde se colocan las muestras, para después realizar las observaciones con los correspondientes aumentos.



Fig.2.2. SEM JEOL JSM-6510LV, localizado en el CCIQS UAEM-UNAM

2.3.6 Análisis termo gravimétrico (TGA) y Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

El comportamiento térmico del hule de llanta ha sido analizado a partir de dos técnicas: análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC), llevándose a cabo en un equipo Perkin Elmer TGA-7 y un equipo Perkin Elmer DSC-6 respectivamente, las pruebas se realizaron en una atmósfera de Nitrógeno de 30°C a 450°C a una razón de calentamiento de 10°C/min. (Fig.2.3). Para el análisis termo gravimétrico se adiciono una cantidad relativamente pequeña de muestra sobre la cápsula de platino, para ser suspendida por un soporte de alambre en forma de gancho para quedar dentro del horno aislado del exterior mediante un tubo de vidrio.

En cuanto a la técnica por calorimetría diferencial de barrido (DSC) la muestra se colocó en cápsulas de aluminio, se sella esta cápsula con una tapa de aluminio para evitar que el material se proyecte fuera de la cápsula, la cantidad de muestra utilizada fue variable encontrando la precisión y calidad de la medición. Al igual que todos las anteriores técnicas se ha realizado un análisis para las partículas de llanta con dosis de irradiación de (0, 200, 250 y 300 kGy).

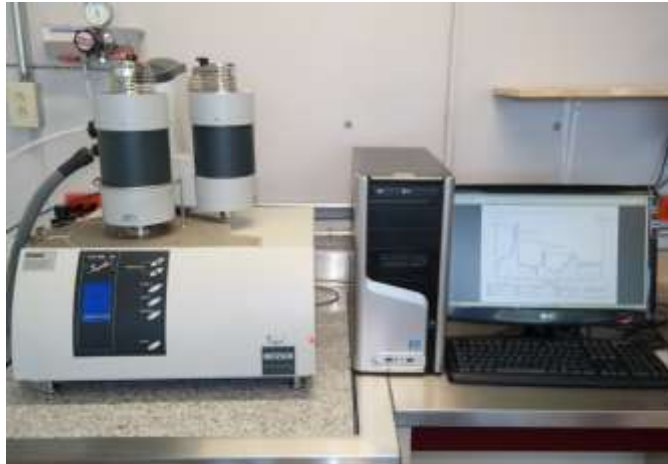


Fig.2.3. Equipo Analizador térmico Netzsch modelo STA 449 F3 Jupiter.

2.4 Materiales usados para la elaboración de probetas de concreto

2.4.1 Partículas de llanta de recicló

Mediante el proceso de molienda se obtuvieron partículas de llanta de recicló a dos diferentes tamaños 2.80mm (7 Mesh) y 0.85mm (20 Mesh).

2.4.2 Cemento

Para la preparación de la mezcla de concreto, se empleó cemento del tipo Portland gris CPC 30 R con base en las especificaciones de la norma N·CMT·2·02·001/02. Esta norma clasifica a este tipo de cemento de acuerdo a su composición definiéndola como Cemento Portland Compuesto. La Tabla 2 muestra la resistencia mínima o máxima a la compresión del cemento para la clase resistente 30 R a los 3 y 28 días.

Tabla 2. Resistencia a la compresión del cemento.

Tipo	Resistencia a la compresión (MPa)		
	A 3 días	A 28 días	
	mínimo	mínimo	máximo
30 R	20	30	50

2.4.3 Agregados finos y gruesos: Arena y Grava

Tanto el agregado fino (Arena), como el agregado grueso (Grava) deben cumplir con la Norma ASTM C 33: “Especificaciones de los Agregados para el Concreto”, y la Norma Oficial NMX C-111-ONNCCE-2004: “Agregados para el concreto hidráulico”. En la norma N-CMT-2-02-002-02, específicamente en el manual M-MMP-2-02-020, se describen los requisitos de calidad de los agregados finos y los límites del tamaño de partícula comprendidos, que se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Límites granulométricos para el agregado fino.

Malla		Porcentaje retenido acumulado
Abertura (mm)	Designación	
9.5	3/8"	0
4.75	No. 4	0-5
2.36	No. 8	0-20
1.18	No.16	15-50
0.6	No.30	40-75
0.3	No.50	70-90
0.15	No.100	90

El agregado fino que se utilizó en la elaboración de concreto fue arena sílice de 0.297 mm (malla 50) de uso comercial, la elección se basa en consideración al mayor porcentaje retenido y en relación a la influencia de impurezas (piedras pequeñas, basura, etc.) que están presentes en la arena afectando su comportamiento en la mezcla de concreto.

(Garay, L.C. 2013) presenta un análisis para determinar la granulometría de agregado grueso (grava) como se muestra en la tabla 2.2, donde se toma el tamaño de partícula adecuado con base al de mayor porcentaje de retención, siendo los tamices No. 3/8, 4 y 10.

Tabla 2.2. Tamices para 1000 g de grava.

Tamiz No. (Abertura)	Peso Retenido	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje que pasa (%)	Porcentaje acumulado (%)
3/8" (9.5 mm)	65	6.5	93.5	6.5

4 (4.75 mm)	120	12	81.5	18.5
10 (2 mm)	725	72.5	9.0	91.5
20 (0.84 mm)	55	5.5	3.5	96.5
25 (0.70 mm)	20	2.0	1.5	98.5
Charola	15	1.5	0	100

Para la elaboración de probetas de concreto se utilizó grava de roca triturada de uso común en construcciones cuyo tamaño de partícula fue de 9.5 mm (tamiz No. 3/8). La selección de este tamaño de partícula se basa en su comportamiento fisicoquímico de la grava con los demás componentes del concreto, debido a que a un mayor tamaño de partícula de agregado será menor el área de superficie a humedecer, así, disminuirá el requerimiento de agua en la mezcla; y para una trabajabilidad específica y riqueza de la mezcla, la relación agua/cemento puede reducirse; con el consiguiente incremento de la resistencia. Sin embargo, por encima del cual la disminución en la demanda del agua es anulada por una menor área de adherencia y la discontinuidad que introducen las partículas muy grandes (Ríos, G, E. 2011).

2.4.4 Agua

Siendo el agua un elemento importante para generar las reacciones químicas en la formación de concreto hidráulico, se ha empleado agua potable de uso común sin ningún residuo sólido o material orgánico suspendido, ausente de grasas o aceites e inodoro, con base en la norma N-CMT-2-02-003/02 “Materiales para concreto hidráulico”, “Calidad del agua para concreto hidráulico”.

2.5 Elaboración de concreto hidráulico *sin* partículas de hule de llanta

Se escogieron las cantidades adecuadas de cada material para la elaboración de probetas de concreto, tomando como referencia estudios realizados por (Garay, L.C. 2013). Para la elaboración de concreto hidráulico sin refuerzo se utilizaron moldes, probetas de forma cilíndrica de acero (Fig.2.4) con las siguientes dimensiones.



$$\text{Volumen de la probeta:} \\ V = \pi r^2 L = \pi (2.5 \text{ cm})^2 (10 \text{ cm})$$

$$V = 1.96 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Fig. 2.4. Probetas de acero

Para determinar las proporciones de una mezcla de concreto es de utilidad indicarla en forma de relaciones, tomando como unidad el cemento, colocarlas de forma ascendente de tamaño, primero el agregado fino y por último el agregado grueso, además es conveniente colocar antes de la unidad el valor de la relación agua/cemento que se considera el de menor proporción.

Tabla 2.3. Relaciones de los componentes para elaboración de concreto.

Relación	Agua : Cemento : Agregado fino : Agregado grueso
R1	1.7 : 1 : 2 : 3
R2	0.50 : 1 : 1.5 : 2.5
R3	0.65 : 1 : 1.5 : 2.5

El objetivo de las anteriores relaciones fue determinar aquella relación con mejores resultados en cuanto a resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días. La relación con los mayores valores de resistencia a la compresión fue R3.

Tabla 2.4. Resistencia a la compresión del concreto R3.

Resistencia a la Compresión (MPa)		
7 días	14 días	28 días
16.0	17.8	21.7

Con base en relación R3 se calcula el volumen (m^3) y el peso (kg) de cada componente de la mezcla de concreto (tabla 2.5).

Tabla 2.5. Volumen y peso de componentes para un m³ de concreto.

Material	Volumen (m³)	Peso (kg)
Cemento	0.167	401.5
Agregado fino	0.249	602.2
Agregado grueso	0.416	1003.7
Agua	0.108	261.4
Aire atrapado	0.060	---
Total	1.000	2268.8

Dado que una probeta tiene un volumen de $1.96 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, se requiere de un peso de 0.444 kg, es decir 444 gramos por probeta de concreto, distribuidos conforme se señala en la tabla 2.6.

Tabla.2.6. Cantidad de material para una probeta de concreto.

Material	Cantidad (g)
Cemento	78.70
Agregado fino	118.06
Agregado grueso	196.77
Agua	51.16

Procedimiento para la elaboración de probetas de concreto sin hule de llanta.

1. El tamaño de partícula de agregado grueso se obtuvo haciendo pasar la grava por mallas metálicas, específicamente en la de 3/8" (9.5 mm), mientras que el agregado fino (arena) se hizo pasar por la malla 50 (0.297 mm).
2. Se pesaron las cantidades de cemento, agregado fino, agregado grueso de acuerdo a la (tabla 2.6) en una balanza granataria, mientras que el agua fue medida en una probeta graduada. Se prepararon los moldes cilíndricos agregando un poco de aceite automotriz a las paredes, esto para una mayor facilidad en el desmonte de las probetas de concreto.
3. Para mezclar todos los materiales se utilizaron dos charolas metálicas redondas y una espátula.
4. En una de las charolas metálicas se mezcló el agregado grueso, fino y el cemento con ayuda de la espátula revolviendo todos los componentes.

5. En la segunda charola metálica con la cantidad de agua requerida, se fue agregando en pequeñas porciones la mezcla de agregado, grueso, fino y cemento de la anterior charola, y mezclando continuamente con ayuda de la espátula (se agregaron poco a poco los componentes de la primera charola al agua para evitar que la mezcla adquiriera una apariencia seca).
6. Terminado el proceso de revoltura de concreto, este se depositó en los moldes cilíndricos (realizarlo con ayuda de la espátula, empujando, picando la mezcla para evitar la formación de burbujas o espacios libres en el concreto).
7. Se elaboraron duplicados de probetas de concreto para 7, 14 y 28 días.

2.6 Elaboración de concreto hidráulico con partículas de hule de llanta.

Para la elaboración de concreto hidráulico con hule de llanta se utilizó como base la tabla 2.7. Las partículas de llanta se agregaron sustituyendo el 1, 3, 5 % de agregado fino (la arena). El detalle de los componentes del concreto con hule de llanta se muestra en la tabla 2.7.

Tabla. 2.7. Cantidad de material (g) para una probeta de concreto con refuerzo.

Cemento (g)	Agua (g)	Grava (g)	Arena (g)	Cantidad de llanta (g)	% Llanta
78.70	51.16	196.77	116.87	1.18	1
78.70	51.16	196.77	114.51	3.54	3
78.70	51.16	196.77	112.15	5.90	5

Procedimiento para la elaboración de probetas de concreto con hule de llanta.

1. Se prepararon los materiales: agregado grueso malla 3/8" (9.5 mm), agregado fino malla 50 (0.297 mm).
2. Se pesaron en una balanza granataria las cantidades señaladas de cemento, en una probeta graduada se midió la cantidad de agua requerida y en una balanza analítica se pesaron las cantidades al 1, 3 y 5 % en peso de partículas de llanta.

3. El agregado grueso y fino, el cemento, las partículas de llanta de recicló se mezclaron en una charola metálica y con ayuda de una espátula.
4. La mezcla formada anteriormente se agregó en proporciones pequeñas a otra charola metálica que contenía el agua, se batió constantemente evitando la resequedad de la mezcla.
5. Terminada la revoltura, el concreto se vació en moldes cilíndricos de acero, con ayuda de una espátula se empujó, se picó la revoltura para evitar la formación de burbujas y espacios libres.
6. Se elaboraron probetas a los 7, 14 y 28 días, a dosis de irradiación de 200, 250 y 300 kGy, tamaño de partícula de llanta 2.80 mm (7 Mesh) y 0.85 mm (20 Mesh) y concentración de partículas de llanta 1,3 y 5 %.

Pruebas de compresión en probetas de concreto con y sin hule de llanta

Las probetas de concreto con y sin hule de llanta fueron sometidas a pruebas de compresión, a los 7, 14 y 28 días de curado, para tal prueba se llevó a cabo el siguiente procedimiento.

1. Se desmontaron las probetas de concreto a los 7, 14 y 28 días de curado.
2. Se prepararon las probetas de concreto para las posteriores pruebas de compresión (se eliminaron las imperfecciones superficiales superiores en algunas ocasiones con ayuda de una lija para una mayor trabajabilidad del material).
3. Las pruebas de compresión se llevaron a cabo en una Máquina Universal de Ensayos marca Controls^{MR} con capacidad de 30 toneladas, localizada en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA) de la Facultad de Química de la UAEM (Fig. 2.6).
4. El proceso de trabajo del equipo consistió en:
 - Encender la PC e ingresar al programa CONTROLS (Fig. 2.7)
 - Encender la máquina multiensayo y presionar el botón de paro de emergencia.
 - Escribir las condiciones a las cuales va a trabajar dicho ensayo.
 - Colocar la probeta en la superficie de contacto de carga, la parte inferior y superior de las probetas deben estar completamente lisas.

- Para la prueba de compresión, se retira el botón de paro de emergencia, ya dentro del programa CONTROLS se enciende el motor y se precarga la probeta.
- Terminada la precarga da inicio la prueba, esta finalizará cuando exista una ruptura de la probeta, la máquina lo indica con una ventana en la PC indicando el lugar donde se van a guardar los datos.
- Se almacenan los datos en un archivo .txt para su posterior análisis.

Las probetas se etiquetan de acuerdo al siguiente esquema:

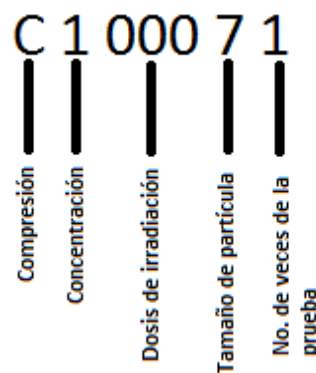


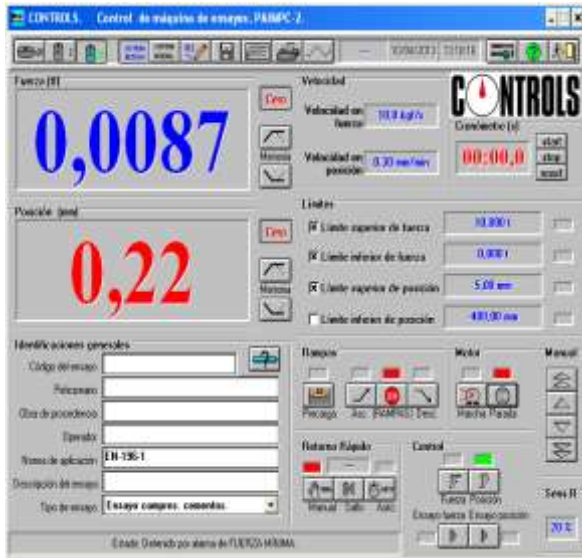
Figura.2.5. Código utilizado para designar a cada tipo de probeta.



Figura.2.6. Máquina Universal de Ensayos marca Controls^{MR} para pruebas mecánicas.

Fig. 2.7. Programa CONTROLS para pruebas mecánicas.

Variable de control: Posición
Velocidad: 0,30 mm/min
L. superior de fuerza: 10,000 t
L. superior de posición: 5,00 mm



Condiciones de trabajo para la prueba de compresión

2.7 Determinación de la resistencia a la compresión

La norma Mexicana NMX-C-083-ONNCCE 2002 establece la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto con masa volumétrica mayor a 900 kg/m^3 .

El cálculo e interpretación de los resultados se describe a continuación:

El programa Controls genera una hoja txt con valores de fuerza y posición que serán de utilidad para determinar el esfuerzo y la deformación. El cálculo de la resistencia a la compresión se realiza dividiendo la carga máxima soportada durante la prueba, entre el área promedio de la sección transversal determinada con el diámetro medido (fig.2.8).



Figura 2.8. Ejemplo de concreto cilíndrico para cálculo de resistencia a la compresión.

El informe de la prueba debe contener:

- Clave de identificación de la probeta.
- Edad, tiempo de la probeta.
- Diámetro y altura en cm.
- Área transversal en cm².
- Masa de la probeta en kg.
- Carga máxima en N (kgf).
- Resistencia a la compresión a 100 kPa (1 kgf/cm²).
- Defectos observados en la probeta.
- Descripción de falla de ruptura.

2.8 Cálculo del módulo elástico de concretos

Basándose en la NMX-C-128-ONNCCE-2005 “Industria de la construcción-concreto sometido a compresión- determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson”, el cálculo del módulo elástico fue determinado a partir de los datos de áreas, cargas, deformación, donde se obtuvo la tabla 3 “esfuerzo vs deformación unitarias” de cada carga, así como el esfuerzo máximo.

El Figura “esfuerzo vs deformación” permite hacer uso del método estático secante que relaciona el esfuerzo y la deformación unitaria axial, al estar sometido el concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico, el cual es la pendiente de la secante definida por dos puntos de la curva esfuerzo-deformación, dentro de la zona elástica (NMX NMX-C-128-ONNCCE, 2005), cuya ecuación se describe a continuación:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{e_1 - 0.00005}$$

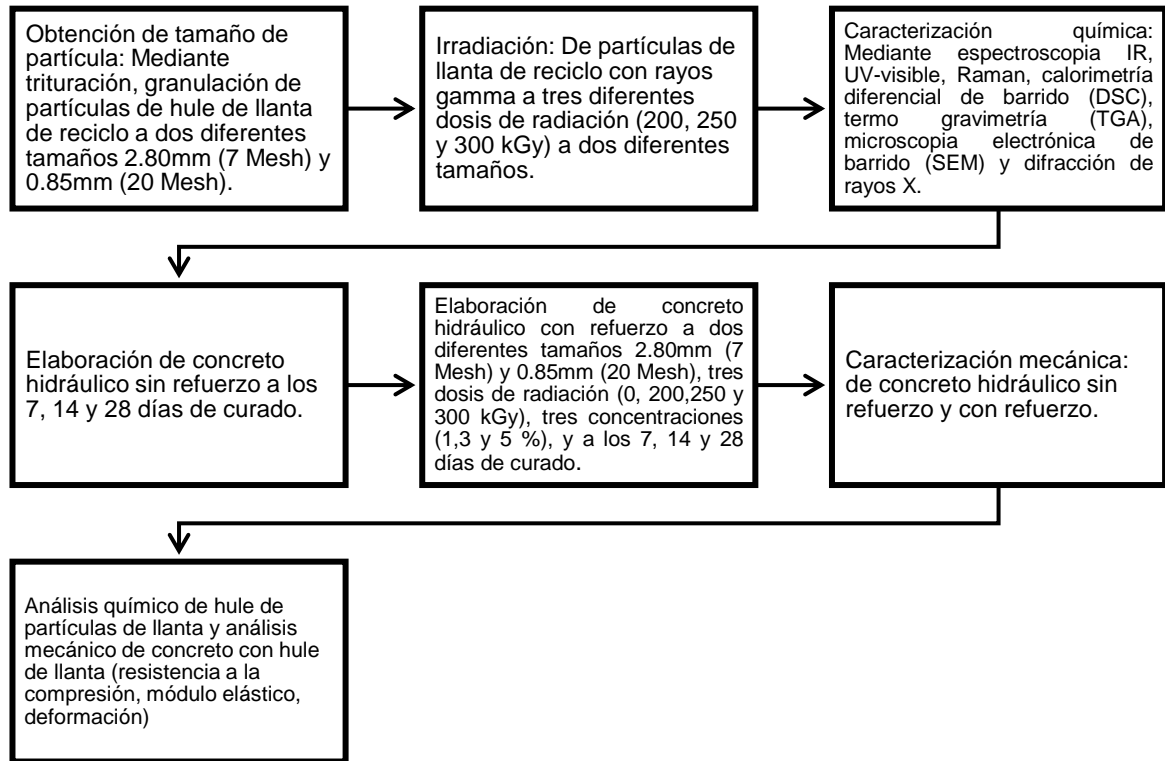
Dónde:

S_1 = esfuerzo en kg/cm² correspondiente a la deformación unitaria (e_1) de 0.00005.

S_2 = esfuerzo correspondiente al 40% del esfuerzo máximo.

e_2 = deformación unitaria correspondiente al esfuerzo S_2 .

Fig. 2.9. Metodología general para la elaboración de concreto hidráulico con partículas de llanta de recicló.



Capítulo 3

Resultados

3.1 Resistencia a la compresión de concreto testigo

En la figura 3 se describe el comportamiento mecánico de resistencia a la compresión del concreto testigo (T_0), es decir del concreto elaborado sin hule de llanta y sin ninguna incidencia de radiación gamma. La resistencia máxima se alcanza a los 28 días de curado (18.6 MPa) y la mínima a los 7 días (13.3 MPa). En general, conforme el tiempo de curado aumenta se presenta un efecto progresivo creciente en cuanto a la resistencia a la compresión.

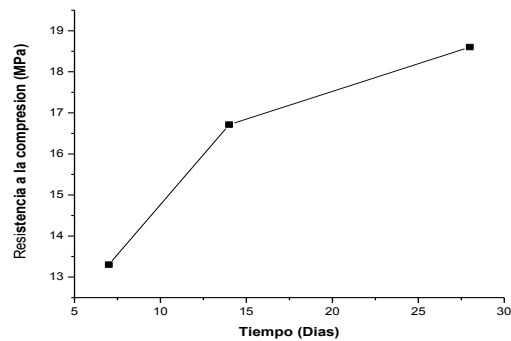


Fig.3. Resistencia a la compresión de concreto testigo a 7,14 y 28 días.

En la figura 3.1 resistencia a la compresión vs. Deformación, se observa que la resistencia aumenta conforme la deformación va aumentando, para 7,14 y 28 días de curado. La resistencia llega a un máximo, posteriormente desciende y finalmente llega a un punto de ruptura.

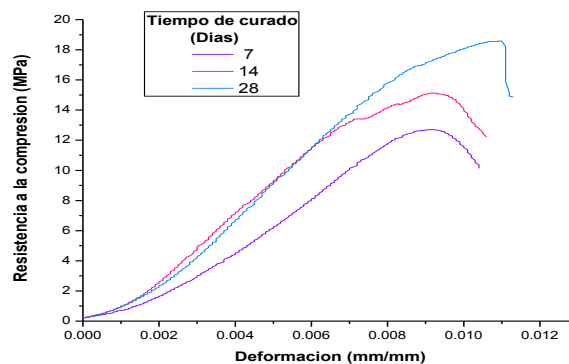


Figura 3.1. Resistencia a la compresión vs deformación de concreto testigo a 7, 14 y 28 días.

Los valores de la resistencia a la compresión, la deformación y módulo de elasticidad (E), de los concretos testigos, se muestran en la tabla 3. El módulo de Young se calculó con base en el método secante, explicado en el capítulo anterior.

Tabla 3. Esfuerzo, deformación y módulo de elasticidad de concretos testigo a 7, 14 y 28 días.

Tiempo (días)	Esfuerzo (S ₁) (kg/m ²)	Esfuerzo (S ₂) (kg/m ²)	Deformación (e ₁)	Deformación (e ₂)	Módulo de Elasticidad (GPa)
7	4.11	51.06	0.0005	0.0043	1.21
14	4.89	61.88	0.0005	0.0035	1.86
28	4.94	76.22	0.0005	0.0043	1.83

El tiempo de curado es un factor que favorece positivamente las propiedades mecánicas del concreto. El módulo de elasticidad mejora para un tiempo de 7 y 14 días de curado, sin embargo para 28 días existe una ligera variación en el resultado. La posibilidad de encontrar factores que afecten las propiedades mecánicas, se incrementa en términos del grado de humedad del ambiente y del procedimiento de preparación (Quimbay, 2009); en términos generales, un exceso de agua en la mezcla de concreto permite una buena gradación de agregados, se vuelve más manejable y por tal motivo permite obtener mayores valores en las propiedades mecánicas.

3.2 Resistencia a la compresión de concreto con hule de llanta sin irradiar

Como se mencionó con anterioridad, se utilizó un código para cada tipo de concreto, que incluye como variables: la concentración de hule, tamaño de hule, dosis de irradiación y los tiempos de curado (7, 14 y 28 días).

Por ejemplo, la descripción de cada letra y número, del código siguiente, es:

X Y Z
C 1 000 7

C: prueba de compresión

X: concentración de partícula (1, 3 y 5%)

Y: dosis de irradiación (0, 200, 250 y 300 kGy)

Z: tamaño de partícula [7 Mesh (2.80 mm), y 20 Mesh (0.85 mm)].

En la figura 3.2 se presentan los valores de la resistencia a la compresión de concretos testigo y de concretos con hule de llanta. El análisis de los mismos se hace siguiendo los parámetros: a) concentración, y b) tamaño de las partículas de hule, y c) días de curado.

Respecto a la concentración de partículas, se observan valores mayores para 1% de partículas de llanta, es decir la resistencia disminuye gradualmente conforme aumenta la concentración de partículas de hule. En el caso del tamaño de partículas, los mayores valores se logran con partículas de 2.80 mm. Más aún, la resistencia se incrementa conforme aumenta el tiempo de curado, siendo la mayor a 28 días.

Cabe mencionar, que el valor de resistencia del concreto testigo (To) a 28 días de curado, es mayor que los valores de resistencia logrados por los concretos con partículas a concentraciones de 1, 3 y 5 %; excepto para el concreto con 1% de partículas de tamaño de 2.8 mm y curado a 28 días, cuyo valor es 1.6 MPa mayor.

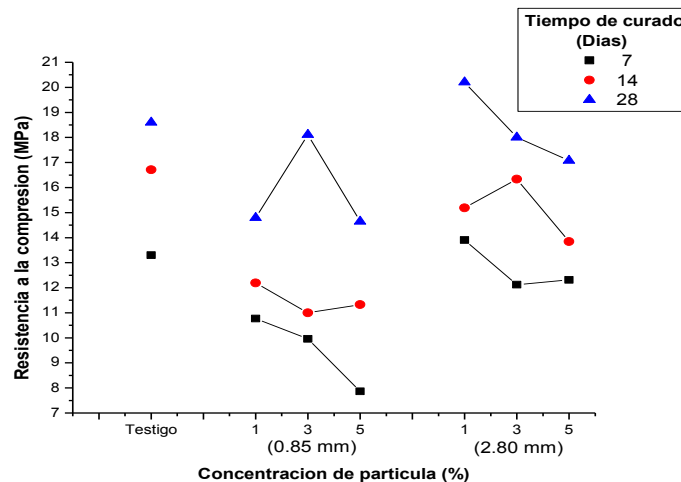


Fig.3.2. Resistencia a la compresión de concreto con partículas sin irradiar.

Los valores mostrados en la figura 3.2 de resistencia a la compresión se enlistan en la tabla 3.1, junto con los valores de la deformación asociada a esta resistencia, y el módulo de elasticidad, para concretos con partículas de hule curados a 28 días.

Tabla 3.1. Resistencia, deformación máxima y módulo de elasticidad de concretos a los 28 días de curado.

Concreto	Resistencia (MPa)	Deformación (mm/mm)	Módulo de elasticidad (GPa)
Testigo	18.60	0.0393	0.970
1%, 0.85 mm	14.79	0.0065	2.45
1%, 2.80 mm	20.20	0.0117	1.42
3%, 0.85 mm	18.10	0.0072	2.70
3%, 2.80 mm	18.00	0.0090	1.53
5%, 0.85 mm	14.64	0.0084	1.52
5%, 2.80 mm	17.07	0.0072	2.40

Los mayores valores de resistencia a la compresión y de deformación se logran con 1% de partículas de hule y tamaños de 2.80 mm; el valor de la deformación de 0.0117 mm/mm es casi cuatro veces mayor que el valor estándar reportado en la literatura para concreto, de 0.003 mm/mm.

En el caso del módulo de elasticidad, los mayores valores se logran con 3% de partículas de hule y tamaños de 0.85 mm, es decir se logra un material rígido. Mientras que los concretos con menor módulo de Young son aquellos con 1% de partículas y tamaños de 2.80 mm, es decir se logra un material dúctil. Es decir, un material rígido requiere tamaños pequeños y concentraciones grandes de partículas; mientras que uno dúctil, presenta lo opuesto, tamaños grandes y concentraciones pequeñas de partículas de hule.

La ductilidad de estos concretos, basada en tamaños grandes y concentraciones pequeñas de partículas, indica un mayor contenido de agua, y por lo tanto mayor trabajabilidad y fluidez. Sin embargo, se genera disminución de la resistencia a la compresión, por los espacios libres generadores por las partículas de tamaño grande.

3.3. Resistencia a la compresión de concreto con partículas de llanta irradiadas

3.3.1 Concreto con partículas irradiadas a 200 kGy

En la figura 3.3 se muestra la resistencia a la compresión del concreto testigo y los concretos con partículas de llanta irradiadas a 200 kGy. El análisis de los mismos se hace siguiendo los parámetros: a) concentración, y b) tamaño de las partículas de hule, y c) días de curado.

Respecto a la concentración de partículas, se observa que mayor número de estas disminuye de forma gradual la resistencia a la compresión. Mientras que un mayor tamaño de partícula genera mayores valores de resistencia. En términos del tiempo de curado, los mayores valores de resistencia se logran a 28 días.

Cabe mencionar que todos los concretos con partículas irradiadas, tienen valores más bajos que el valor del concreto testigo curado a 28 días.

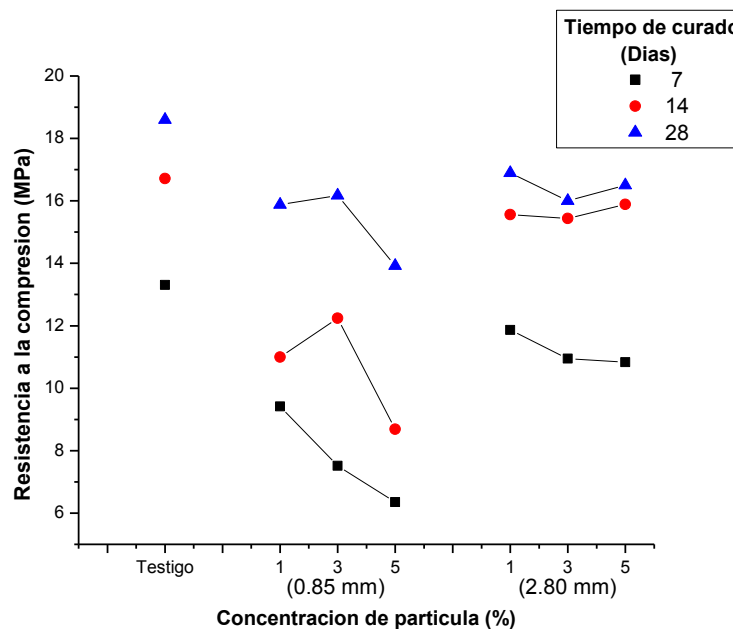


Fig.3.3. Resistencia a la compresión de concreto con partículas irradiadas a 200 kGy.

Los valores de resistencia a la compresión, de deformación y de módulo de Young, se muestran en la tabla 3.2. Se observa que la mayor resistencia a la compresión se logra en concreto con 1% de partículas con tamaño de 2.80 mm. Mientras que la máxima deformación se logra en concreto con 3% y tamaño de partícula de 2.80 mm. Para el caso del módulo de Young, el mayor valor se logra con 5% de partículas de 2.80 mm (concreto rígido), mientras que el menor valor con 5% de partículas de 2.80 mm (concreto dúctil).

Tabla 3.2. Esfuerzo, deformación máxima y módulo de elasticidad de concretos a los 28 días.

Tipo de concreto	Resistencia (MPa)	Deformación (mm/mm)	Módulo de elasticidad (GPa)
Testigo	18.60	0.0393	0.970
1%, 200 kGy, 0.85 mm	15.88	0.0088	1.68
1%, 200 kGy, 2.80 mm	16.89	0.0095	1.59
3%, 200 kGy, 0.85 mm	16.17	0.0092	1.75
3%, 200 kGy, 2.80 mm	16.00	0.0099	1.52
5%, 200 kGy, 0.85 mm	13.91	0.0097	1.29
5%, 200 kGy, 2.80 mm	16.50	0.0069	1.96

Los mayores valores de los tres parámetros mecánicos (resistencia a la compresión, deformación asociada a esta resistencia, y módulo de elasticidad), para concreto con partículas irradiadas a 200 kGy, se da cuando se utilizan partículas grandes, de 2.80 mm. Un incremento en el tamaño de la partícula de hule implica mayor concentración de esfuerzos y menor cantidad de agua en la mezcla.

3.3.2 Concreto con partículas irradiadas a 250 kGy

Los valores de resistencia a la compresión de concretos con partículas irradiadas a 250 kGy, se muestran en la figura 3.4; siguiendo el mismo criterio de análisis en base a: a) concentración, y b) tamaño de las partículas de hule, y c) días de curado. Se tiene que la resistencia va disminuyendo conforme se incrementa la concentración de partículas. Mientras que con los mayores tamaños de partículas se obtienen los mayores valores de

resistencia. En términos del tiempo de curado, se cumple que la resistencia a la compresión se incrementa conforme aumentan los tiempos de curado.

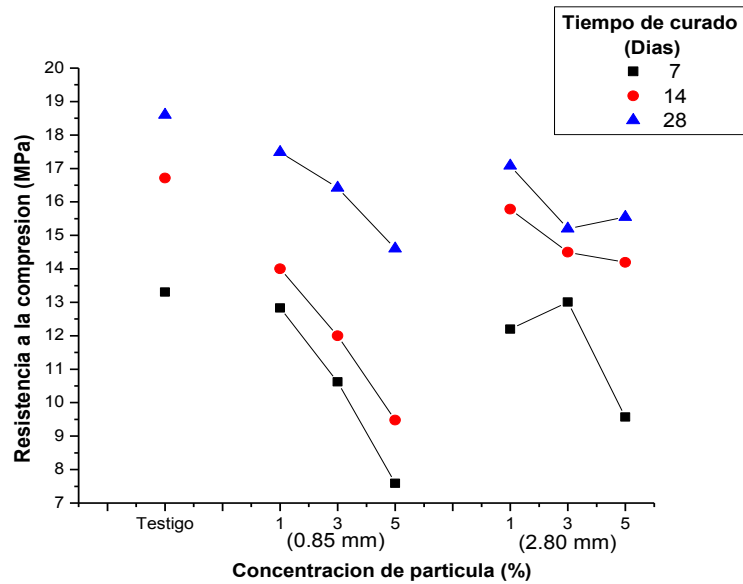


Fig.3.4. Resistencia a la compresión de concreto con partículas irradiadas a 250 kGy. Los valores de resistencia, deformación y módulo de Young se muestran en la tabla 3.3.; los mayores valores de resistencia se logran en concreto con 1% de partículas con tamaño de 0.85 mm. Mientras que la mayor deformación en concreto con 1% de partículas con tamaño de 0.85 mm.

Para el caso del módulo de Young, los mayores valores se logran con 1% de partículas de 2.80 mm, y los menores valores con 1% de partículas de 0.85 mm. Es decir, el concreto con 1% de partículas presenta ambos extremos en los valores. Se requiere mayor cantidad de agua para que el cemento pueda cubrir partículas pequeñas, y con esto obtener un concreto dúctil. Por el contrario un concreto con mayor rigidez y dureza requiere de partículas de mayor tamaño.

Tabla 3.3. Resistencia, deformación máxima y módulo de elasticidad de concretos con partículas irradiadas a 250 kGy.

Tipo de concreto	Resistencia (MPa)	Deformación (mm/mm)	Módulo de elasticidad (GPa)
------------------	-------------------	---------------------	-----------------------------

Testigo	18.60	0.0393	0.970
1%, 250 kGy, 0.85 mm	17.48	0.0104	0.65
1%, 250 kGy, 2.80 mm	17.08	0.0089	1.79
3%, 250 kGy, 0.85 mm	16.42	0.0093	1.66
3%, 250 kGy, 2.80 mm	15.20	0.0084	1.60
5%, 250 kGy, 0.85 mm	14.60	0.0092	1.62
5%, 250 kGy, 2.80 mm	15.54	0.0087	1.73

3.3.3 Concreto con partículas irradiadas a 300 kGy

Para los concretos con partículas irradiadas a 300 kGy, se observa que en términos de la concentración, se obtiene un valor máximo a 3%; mientras que de acuerdo al tiempo de curado la resistencia aumenta conforme aumenta dicho tiempo (figura 3.5). Notable de observar, es que el concreto testigo (T_0) curado a 28 días presenta mayores valores de resistencia que los concretos con partículas irradiadas.

Cabe mencionar que no se presentan los valores de resistencia de concretos con partículas irradiadas a 300 kGy con tamaño de 0.85 mm, debido a que fueron afectadas por la dosis de irradiación y no fue posible mezclarlas en el concreto.

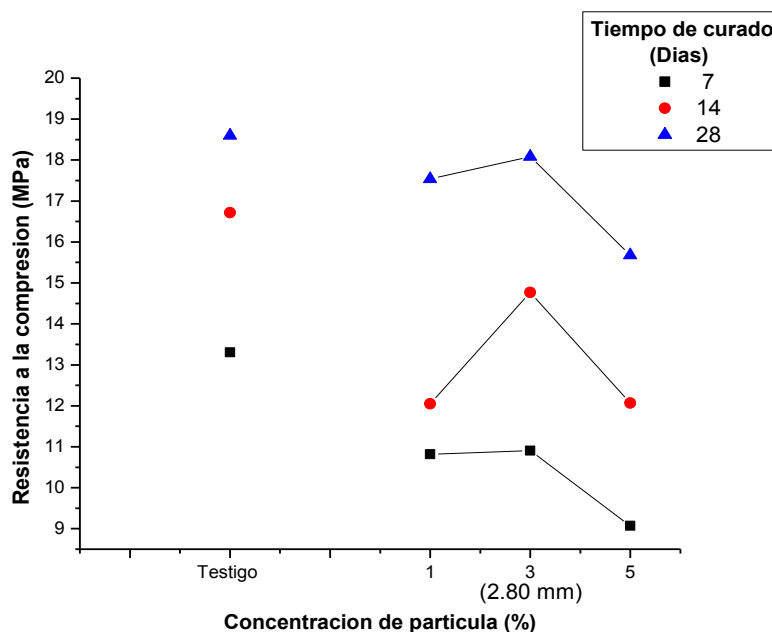


Fig.3.5. Resistencia a la compresión de concreto con partículas irradiadas a 300 kGy.

El mayor valor de resistencia a la compresión y deformación se obtuvo con el concreto con 3% de partículas, un tamaño de 2.80 mm, así también este tipo de concreto presenta el menor módulo de elasticidad (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Esfuerzo, deformación máxima y módulo de elasticidad de concreto a los 28 días.

Tipo de concreto	Resistencia (MPa)	Deformación (mm/mm)	Módulo de elasticidad (GPa)
Testigo	18.60	0.0393	0.970
1%, 300 kGy, 2.80 mm	17.53	0.0084	1.82
3%, 300 kGy, 2.80 mm	18.08	0.0087	2.11
5%, 300 kGy, 2.80 mm	15.67	0.0083	1.78

Es evidente que la propiedad de resistencia a la compresión siempre es de menor valor para concreto con partículas irradiadas, respecto al concreto control. Pero no así, la deformación ni el módulo de Young. En la figura 3.6, se muestra el comparativo del módulo de elasticidad (Young) para ambos tipos de concreto curados a 28 días.

La dosis de irradiación aplicada a las partículas de hule favorece la propiedad elástica en el concreto. Es importante mencionar que un aumento en la dosis de irradiación genera un incremento en el módulo de elasticidad, es decir el material se vuelve más rígido. La energía ionizante genera entrecruzamientos en las cadenas de polímero; cada molécula fragmentada logra unirse a otra molécula y con esto influir significativamente en la elasticidad del material.

En el concreto control los valores para 1% son de 1.43 GPa mientras que para 5% son de 2.40 GPa, es decir una diferencia del 67%, mientras que para concreto con partículas irradiadas a 250 kGy esta diferencia se reduce a tan solo el 12%. Algo relevante de esta investigación, es que se puede utilizar una concentración del 5% de partículas irradiadas a 250 kGy y reducir el módulo de Young notablemente, de 2.4 GPa para el concreto control hasta 1.73 GPa, es decir una disminución del 40%.

Es por tanto conveniente el uso de una concentración mayor de partículas irradiadas (5%) y obtener disminución en la rigidez del material, haciéndolo más flexible (dúctil).

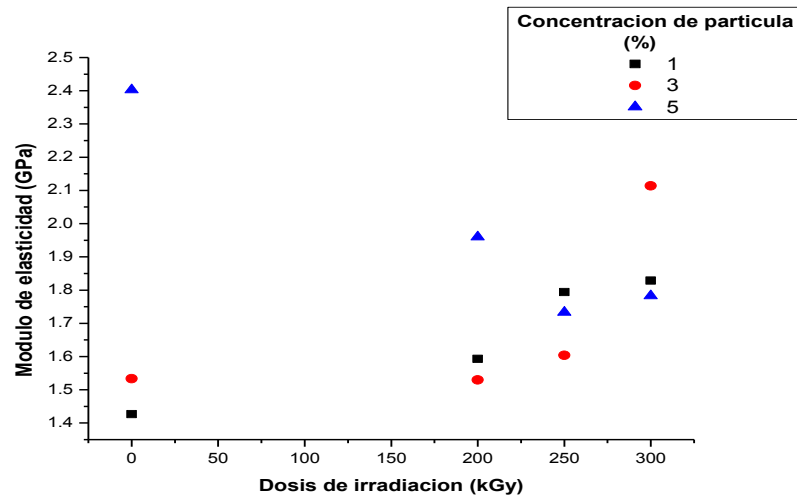


Fig.3.6. Comparación del módulo elástico en relación a la dosis de irradiación.

3.3.4 Resistencia a la compresión de concreto con partículas de 0.85 mm

En la figura 3.7 se muestran los valores de resistencia a la compresión de concretos con partículas de 0.85 mm. Respecto a la dosis de irradiación, los mayores valores se observan para concretos con partículas irradiadas a 250 kGy, siendo los que contienen 1% de partículas los más resistentes. Por otro lado, a mayor concentración de partículas se provoca disminución en la resistencia.

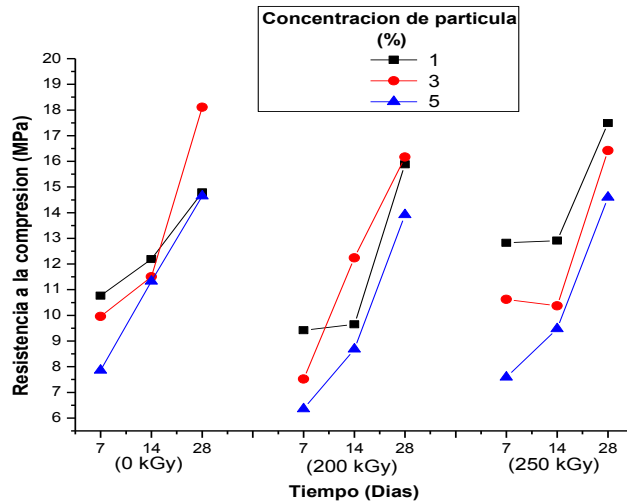


Fig.3.7. Resistencia a la compresión de concreto con partículas irradiadas de 0.85 mm.

3.3.5 Resistencia a la compresión de concreto con partículas de 2.80 mm

Los valores de resistencia de concretos con partículas de 2.80 mm se muestra en la figura 3.8. Respecto a la dosis de irradiación, los mayores valores se logran con partículas irradiadas a 300 kGy. Mientras que en términos de la concentración de partículas, se observa que la resistencia disminuye para concentraciones mayores.

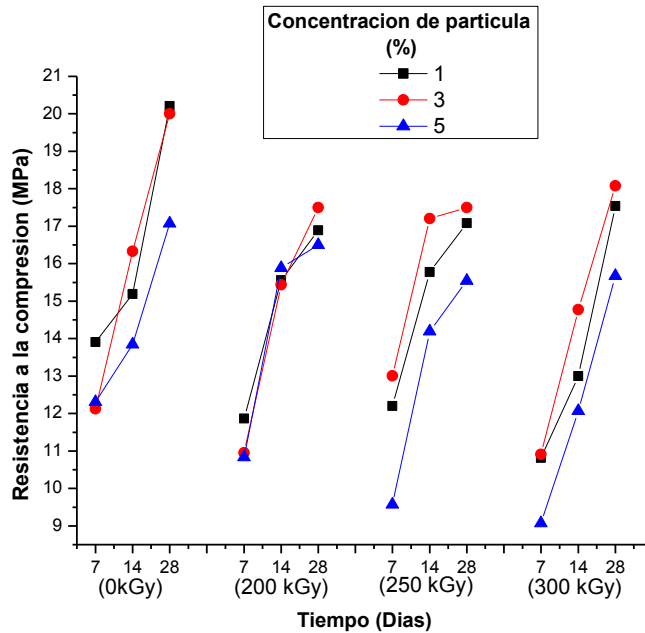


Fig.3.8. Resistencia a la compresión de concreto con partículas irradiadas de 2.80 mm.

Es importante señalar que los valores de resistencia del concreto control (sin partículas irradiadas), son mayores que los concretos con partículas irradiadas. Es decir, la irradiación gamma no mejora la propiedad de resistencia a la compresión, independientemente del tamaño de partícula utilizado.

En teoría, para concretos sin partículas irradiadas, la resistencia a la compresión disminuye conforme aumenta el tamaño de las partículas; debido a que estas generan un mayor contenido de aire y provocan fracturas. Sin embargo, para el concreto con partículas irradiadas sucede un fenómeno contrario, mayor tamaño de partícula genera mayor resistencia.

3.4 Caracterización fisicoquímica de las partículas de llanta

Las partículas de llanta previamente trituradas, granuladas e irradiadas (a 200, 250 y 300 KGy), fueron analizadas mediante técnicas de caracterización química, superficial y térmica.

Espectroscopia de Infrarrojo (IR)

En la figura 3.9 se muestra el espectro de infrarrojo en la región de $4000-2000\text{ cm}^{-1}$ del hule de llanta irradiado. Se observan dos bandas a 2913 y 2839 cm^{-1} , que corresponden al movimiento vibratorio tipo stretching de grupos metileno ($-\text{CH}_2-$) del SBS, SBR e isopreno. Respecto a la dosis de irradiación, se observa mayor porcentaje de transmitancia para las partículas irradiadas que las no irradiadas. Con el detalle, de que es mayor el porcentaje para partículas irradiadas a 250 kGy que las irradiadas a 300 kGy.

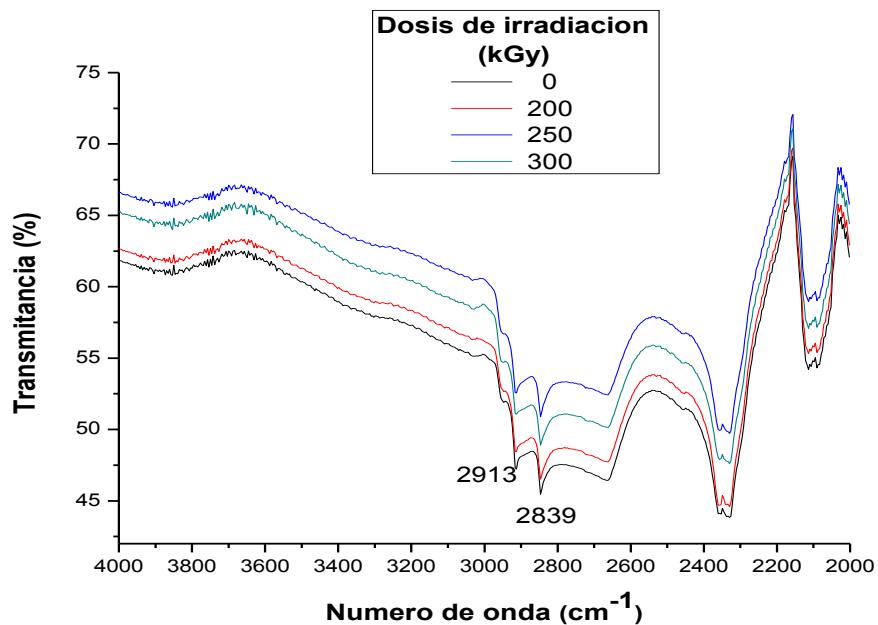


Fig.3.9. Espectro infrarrojo de partículas llanta irradiadas y sin irradiar (4000 a 2000 cm^{-1}).

La región de 2000 a 735 cm^{-1} del espectro de infrarrojo se muestra en la figura 3.10 ; se observa una señal a 1534 cm^{-1} correspondiente al movimiento tipo stretching de un doble enlace C=C aromático del hule SBS. Otra señal a 1436 cm^{-1} que corresponde a un movimiento de flexión del grupo metileno (-CH₂-); también se observa la señal a 1069 cm^{-1} , que corresponde al polidimetilsiloxano (Si-O-Si), la cual casi desaparece a una dosis de 300 kGy, es posible que estos enlaces se rompan. Finalmente, se observa una señal a 818 cm^{-1} , correspondiente al movimiento tipo stretching del enlace C-H.

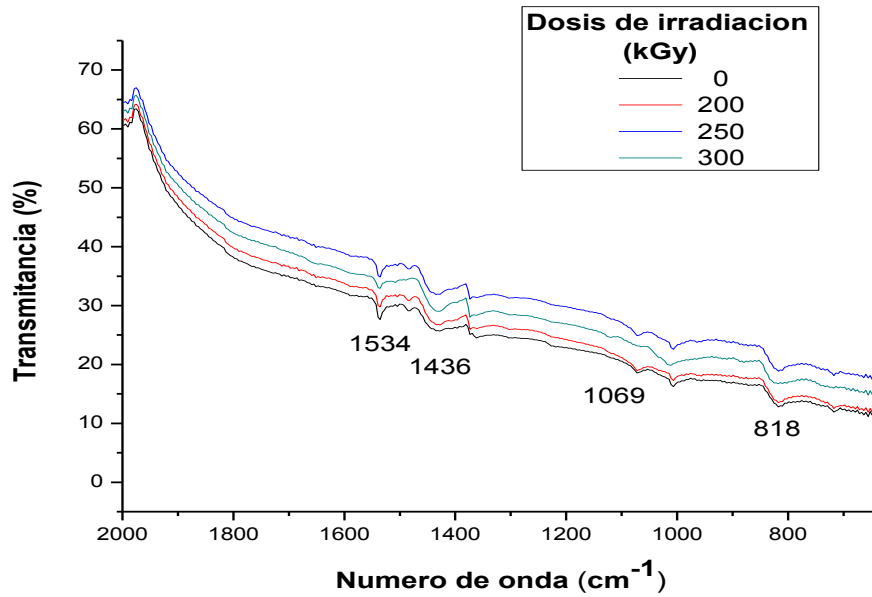


Fig.3.10. Espectro infrarrojo de partículas llanta irradiadas y sin irradiar (2000 a 735 cm^{-1}).

Espectroscopia UV-visible

El espectro de UV-visible de reflectancia difusa de las partículas de llanta se muestra en la figura 3.11. Se observa para las partículas sin irradiar un mínimo de 59.1 % de reflectancia; porcentaje que varía muy poco para partículas irradiadas a 200 y 250 kGy, no así para dosis de 300 kGy, donde el porcentaje de reflectancia es de 69 %. Es decir, a mayor dosis de irradiación se presenta mayor reflectancia, esta propiedad óptica del hule de llanta contribuye al cambio en las propiedades mecánicas del concreto.

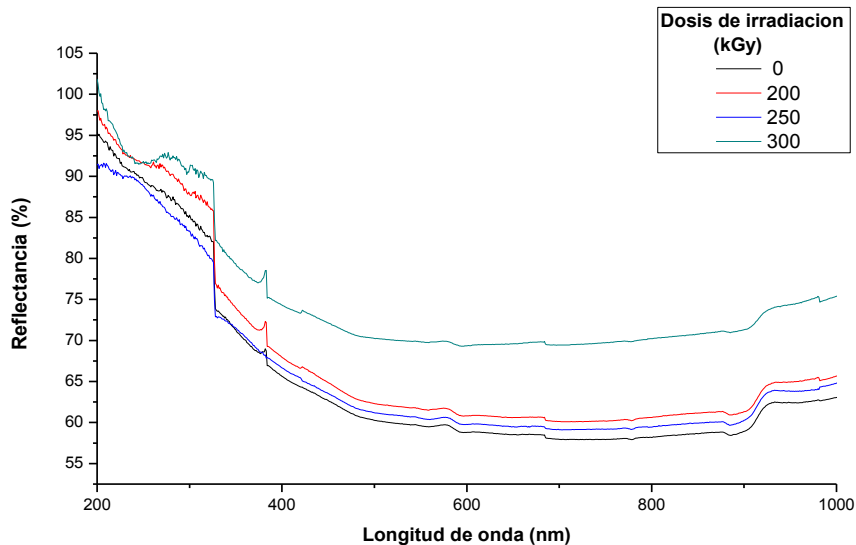


Fig.3.11. Espectro UV-visible de partículas de llantas irradiadas y sin irradiar.

Las longitudes de onda y la energía, asociadas al band gap para 0, 200, 250 y 300 kGy son 327, 328, 333 y 329 nm; y 3.79, 3.78, 3.72 y 3.77 eV, respectivamente. Valores que son representativos de un material aislante, como lo es el hule, con enlaces covalentes, sin deslocalización de electrones de valencia en la cadena hidrocarbonada (Morsya, Ismaielb & Yehiab, 2013).

Señales menores a 300 nm corresponden a transiciones electrónicas tipo $\pi \rightarrow \pi^*$, como la del butadieno que se presenta a 217 nm.

Espectroscopia Raman

El espectro Raman de las partículas de llanta irradiadas y sin irradiar, se muestran en la figura 3.12, en primera instancia se observa mayor luminiscencia y mayor intensidad de la señal Raman para los espectros correspondientes a las partículas sin irradiar e irradiados a 300 kGy; no así para los espectros a 200 y 250 kGy, donde las intensidades bajan y los picos están bien definidos.

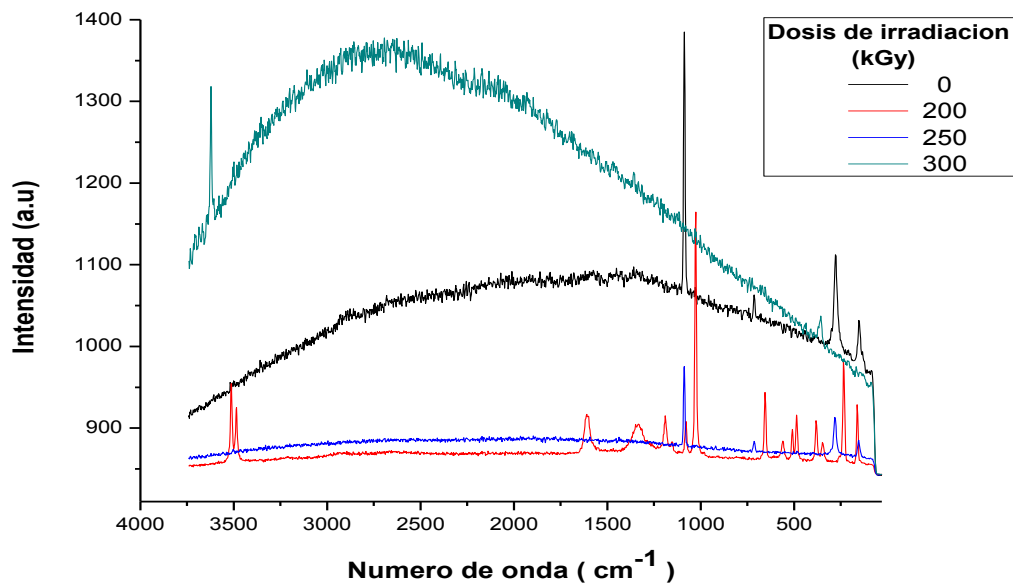


Fig.3.12. Espectro Raman de partículas de llanta irradiadas y sin irradiar.

Las bandas detectadas para las partículas de hule irradiadas y sin irradiar se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Bandas Raman de partículas de hule.

Dosis de irradiación (kGy)	Número de onda (cm ⁻¹)	Asignación
0	1087	ν_s Si-O-Si
	1015	δ C-H aromático en el plano
200	1614	ν C=C polibutadieno
250	3511	ν C-H aromático
	1101	δ plano aromático
300	3610	ν C-H aromático

El espectro de hule sin irradiar presenta una señal a 1087 cm^{-1} que corresponde a un movimiento tipo stretching simétrico Si-O-Si, molécula generada en el proceso de vulcanización del hule.

Las señales a 200 kGy disminuyen de intensidad respecto a la de partículas sin irradiar. A esta dosis, las partículas presentan una señal a 1015 cm^{-1} de un movimiento de deformación C-H aromático en el plano, una señal a 1614 cm^{-1} correspondiente a la vibración stretching del doble enlace C=C y una señal a 3511 cm^{-1} stretching C-H aromático.

Una disminución de señales se puede observar en las partículas de hule irradiadas a 250 kGy para el cual se observa una señal a 1101 cm^{-1} de deformación plano aromático de estireno siendo esta una molécula conformacional del hule.

Para partículas irradiadas a 300 kGy se observa una señal a 3610 cm^{-1} tipo stretching C-H aromático. Un incremento en la dosis de irradiación puede generar un arreglo molecular en el polímero, un cambio distinto en comparación a las anteriores dosis de irradiación incluso una aparición de nuevas señales.

Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Las imágenes SEM de hule de llanta irradiada y sin irradiar a un aumento de 100x, se presentan en la figura 3.13. La superficie del hule de llanta sin irradiar presenta partículas pequeñas y pequeñas cavidades, así como algunas grietas. Mientras que para 200 kGy de irradiación, la superficie se vuelve rugosa, con partículas con diferentes tamaños y grietas de mayor tamaño. Las partículas irradiadas a 250 kGy muestran grietas más definidas y una superficie rugosa. Finalmente, a una dosis de 300 kGy, se observa una superficie muy rugosa, cavidades más grandes y grietas más pronunciadas.

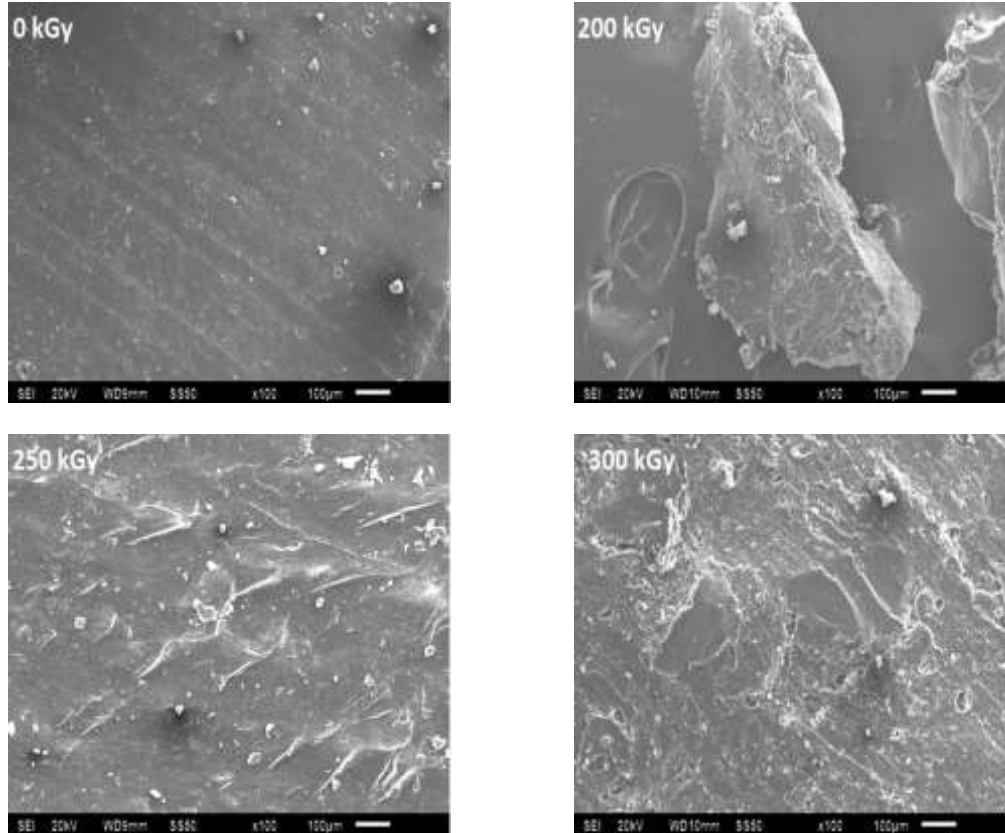


Fig.3.13. Imágenes SEM de hule de llanta a 100x.

La amplificación a 1500x de las imágenes de SEM se muestran en la fig.3.14. La superficie del hule sin irradiar muestra una superficie homogénea (lisa), con partículas dispersas. Para una dosis de 200 kGy se observa el desprendimiento de partículas sobre la superficie y el incremento en la rugosidad; pero conforme aumenta la dosis de irradiación a 250 kGy las partículas aumentan en tamaño y se notan con facilidad las grietas. Finalmente a 300 kGy, las grietas son de mayor tamaño. En cierta medida, el aumento de la dosis de irradiación gamma produce degradación sobre el hule, manifestada por la presencia de más partículas y el incremento en el tamaño de las grietas.

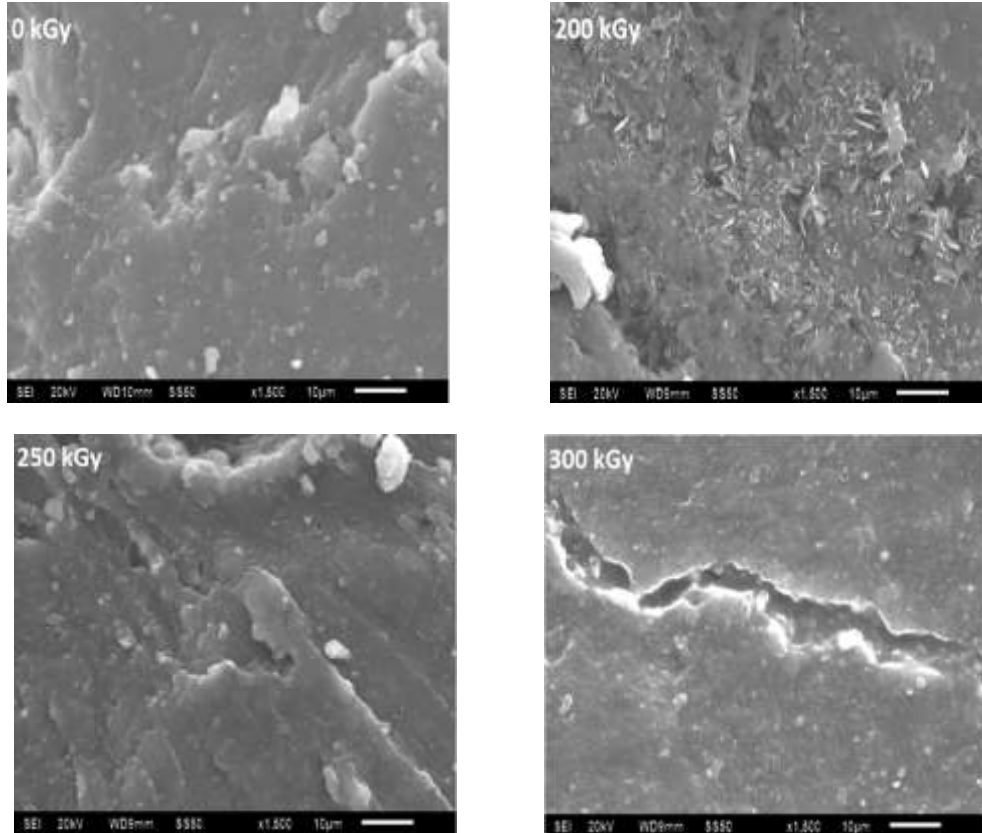


Fig.3.14 Imágenes de SEM de partículas de llanta a 1500x.

La morfología de la superficie depende de la dosis de irradiación; en general este tipo de energía ionizante produce la formación de radicales libres, que permiten en primera instancia el rompimiento de cadenas poliméricas; y posteriormente que las moléculas reactivas se unan a otras moléculas, provocando reticulación.

Análisis termogravimétrico de las partículas de hule (TGA)

La figura 3.15 muestra el termograma de partículas de llanta a diferentes dosis de irradiación. Se observa una pérdida del 1% de la masa a 146 °C, que corresponde a los componentes volátiles del hule. La temperatura T10, es decir la pérdida del 10% de la masa se localiza entre 32 °C y 368 °C. Mientras que la temperatura de transición vítrea (Tg) se localiza entre 188 °C y 382 °C. Finalmente, la temperatura de descomposición (Tm), de 293 °C a 451 °C. Como se indica en la tabla 3.6.

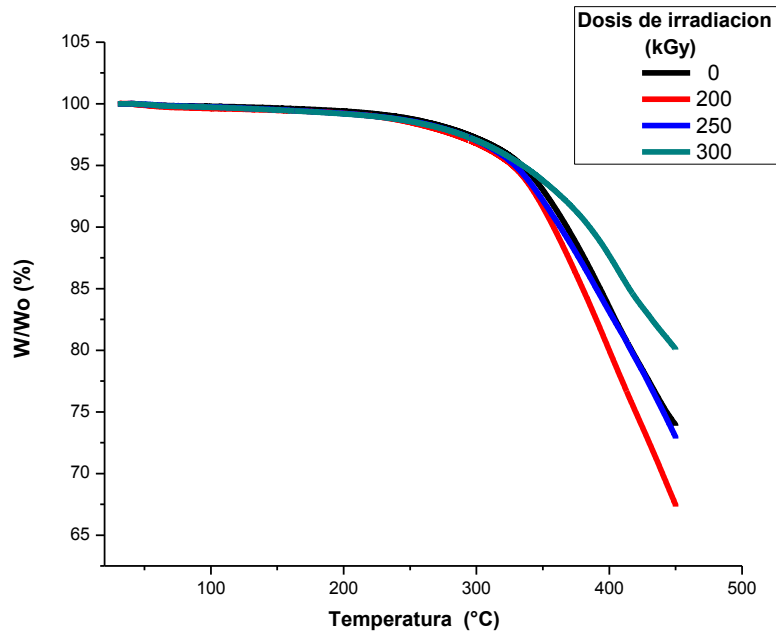


Fig.3.15. Termograma de partículas de llanta.

Tabla 3.6. Temperatura 10%, transición vítrea y descomposición de partículas de hule no irradiadas e irradiadas.

Dosis (kGy)	Temperatura (°C)		
	T ₁₀	T _g	T _m
0	367	279	388
200	357	300	388
250	363	296	388
300	385	295	390

Cuando el material de hule se encuentra a un 10% en peso, aproximadamente 1/3 del total de la masa analizada, la temperatura mantiene una diferencia de 18 °C entre las partículas de hule sin irradiar y aquellas partículas irradiadas a 300 kGy, esa característica se debe a una cierta rigidez del hule determinado por la estructura entrecruzada que adopta el polímero al suministrarle una mayor dosis de irradiación, por lo tanto ese arreglo intermolecular requerirá de un mayor suministro de energía de tipo calorífica.

Partículas irradiadas a 200, 250 y 300 kGy presentan mayor temperatura de transición vítrea (T_g) en comparación con las partículas no irradiadas. La estructura antes y en la transición

vítrea es amorfa, el material es duro y resistente que va cambiando conforme aumenta la temperatura. En la temperatura de transición vítrea los enlaces covalentes y tipo Van der Waals de las moléculas comienzan a debilitarse cambiando el hule a un cierto estado blando, se presenta un movimiento local de los segmentos de las cadenas y un desorden que requiere un mayor suministro de temperatura.

La variación entre las temperaturas de descomposición (T_m), para 0, 200 y 250 kGy de irradiación, es de centésimas de grados, lo cual manifiesta que el hule es estable térmicamente hasta dosis de 250 kGy. Sin embargo, para dosis más elevadas (300 kGy), se observa una diferencia de 2°C respecto al valor del hule sin irradiar. Es decir el cambio estructural que provoca la irradiación a 300 kGy, permite que hule sea más resistente a la temperatura y se degrade hasta los 390°C .

Calorimetría Diferencial de Barrido

Conforme a la calorimetría diferencial de barrido (DSC), de las partículas de hule, se observa un pico exotérmico a 373°C , tanto para las partículas irradiadas como las sin irradiar (Figura 3.16). Entre Ambiente y $T= 300^{\circ}\text{C}$ el flujo de calor para las partículas disminuye conforme se incrementa la dosis de irradiación. Pero para temperaturas entre 300°C y 450°C , son menores los flujos de calor para 200 kGy.

La energía en forma de calor hace que las moléculas se encuentran en movimiento. La caída gradual del flujo de calor, en el punto más bajo de la curva se considera como la temperatura de cristalización (T_c), por lo cual, se provoca liberación de calor, es decir la reacción exotérmica se da durante la cristalización.

Para el hule irradiado a 300 kGy, no se observa el pico correspondiente a la temperatura de cristalización (T_c). El hule se vuelve más amorfo con altas dosis de irradiación, esto debido al rompimiento de cadenas y generación de cadenas más pequeñas, las cuales interrumpen la fase cristalina.

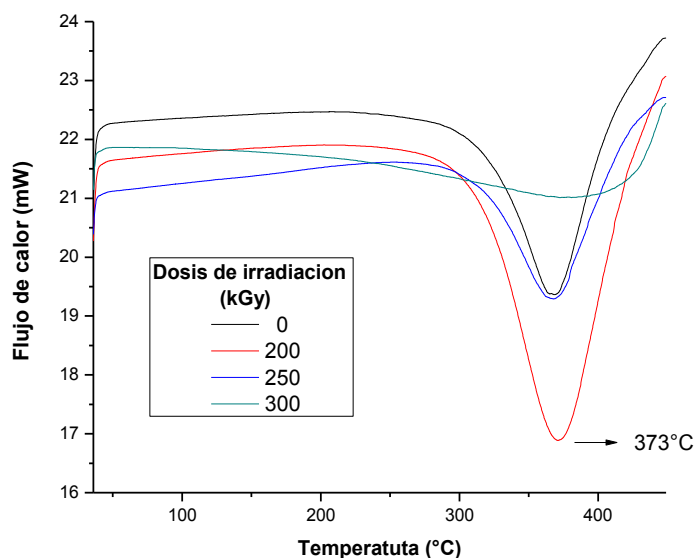


Fig.3.16. Calorimetría diferencial de barrido de partículas de llanta irradiada y sin irradiar.

Difracción de Rayos X

Los espectros de la difracción de Rayos X, de las partículas de hule irradiadas y sin irradiar se muestran en la figura 3.17. Las partículas sin irradiar presentan un pico muy intenso a $2\theta=19^\circ$ y otros picos a $2\theta= 32.0^\circ$, 34.6° , 36.5° y 47.2° . Es posible observar disminución progresiva de intensidad, para las partículas irradiadas. La menor intensidad la presentan las partículas irradiadas a 300 kGy.

Cabe mencionar que a elevadas dosis se generan agrietamientos, por el rompimiento de las cadenas poliméricas del hule. No obstante se mantiene un cierto grado de cristalinidad.

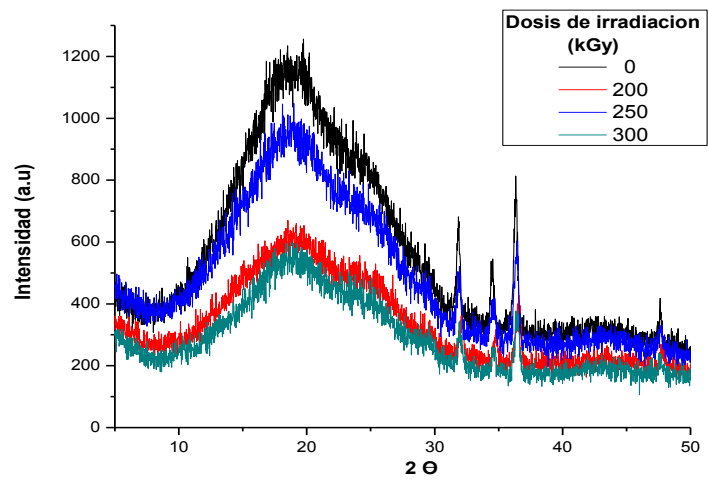


Fig.3.17. Espectro difracción de rayos x de partículas de llanta.

Conclusiones

Los concretos con partículas de llanta recicladas mostraron diferentes características fisicoquímicas, las cuales fueron evaluadas en términos de: a) contenido y tamaño de las partículas de hule, b) dosis de irradiación de las partículas de llanta, y c) tiempo de curado del concreto.

Los mayores valores de resistencia a la compresión fueron obtenidos con 1% de partículas, de 2.80 mm, sin irradiar, y un tiempo de curado de 28 días. Mientras que los de módulo elástico se logran con 3% de partículas de 0.85 mm.

Para el caso de concretos con partículas de llanta irradiadas se obtuvieron los mayores valores de resistencia a la compresión con 3% de partículas de 2.80 mm; mientras que los del módulo elástico con 5% de partículas de 2.80 mm. Es decir, si se aplica radiación, se requiere mayor concentración de partículas para obtener los mayores valores de resistencia y de módulo. Mayor cantidad de partículas de hule de carácter hidrofóbico, requieren mayor cantidad de agua para evitar deterioro en las propiedades de rigidez y ductilidad del concreto. Afortunadamente, las partículas de hule se modificaron por efecto de la radiación y no fue necesario mayor cantidad de agua. En general, la radiación de las partículas produce entrecruzamiento y en consecuencia un reordenamiento de las cadenas poliméricas.

El análisis por microscopía electrónica de barrido pudo constatar los cambios superficiales de las partículas de llanta producidos por la radiación gamma; mientras que las diferentes espectroscopias determinaron: los grupos funcionales del hule (FT-IR y Raman); las transiciones electrónicas tipo $\pi \rightarrow \pi^*$ y $n \rightarrow \pi^*$, basada en la dispersión y reflectancia de la luz (UV-vis).

El análisis termogravimétrico (TGA), permitió determinar el cambio de masa al incrementarse la temperatura, en función de la dosis de radiación. Fue posible determinar la temperatura de transición vítrea (T_g), y la temperatura de descomposición (T_m). Mientras que el análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC), permitió determinar la

temperatura de cristalización, con base en la liberación de energía de la reacción exotérmica.

Finalmente, mediante la difracción de rayos X se analizó la cristalinidad de las partículas de hule, se pudo observar que la intensidad va disminuyendo conforme se incrementa la dosis de radiación.

Bibliografía

Agregados (Arena y Grava). Disponible en: <http://www.sitecal.com.bo/files/14.%20ENSAYO%20GRANULOMETRICO%20GRAVA-ARENA.pdf>. [Consultado en: noviembre 2016].

Aiello, M.A., Leuzzi, F. (2010). Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state. *Waste Management*. 30: 1696–1704.

Albano, C. Reyes, J. Ichazo, M. N. González, J., Hernández, M. Mechanical, thermal and morphological behavior of PS/PP blends: High Doses (70-1300 kGy) of Gamma Irradiation. Disponible en: <http://www.revistadelaacademiadeingenieria.com/index.php/ingenieria/article/viewFile/543/543>. [Consultado en: septiembre 2016].

Albano, C. Camacho, N. Hernández, M. Bravo, J, A. Guevara, H. (2008). Estudio de concreto elaborado con hule de reciclado de diferentes tamaños de partículas. *Rev. Fac. Ing. UCV*. 23: 1.

Alexander M. (1996). Aggregates and the deformation properties of concrete. “ACI Materials journal,” (U.S.A.), 93, p. 576.

Bishop, M. (2001). Cement Hydration Inhibition and Crosslinking in the Guar-borate System. (Tesis de Doctorado). Rice University. Houston, Texas.

Bravo M, Brito J. (2011). Concrete made with used tyre aggregate: durability related performance. *Journal of Cleaner Production*. 25; 42-50.

Características de los materiales N-CMT-2-02-001/02. Disponible en: <http://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-2-02-001-02.pdf>. [Consultado en: septiembre 2016].

Chen, J.J., Thomas, J.J., Taylor, H.F.W., Jennings, H.M. (2004). “Solubility and structure of calcium silicate hydrate” *Cem. Concr. Res.* 34: 1499-1519.

Coran. A.Y. (1995), Vulcanization conventional and dynamic, *Rubber Chem Technol* 68: 351.

De López, G, L. (2003). El concreto y otros materiales para la construcción. 2da edición. Universidad Nacional de Colombia sede Manízales. Colombia. (pp.9-29).

Garay, L, C. (2013). Efecto de materiales de reciclado de envases de Tetra Pak y la radiación gamma en concreto hidráulico. (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca; Estado de México.

Hunnicut, A.W. (2013). Characterization of calcium-silicate-hydrate and calcium-alumino-silicate-hydrate. University of Illinois. Urbana; Illinois.

Imcyc. (2008). Determinación de la Resistencia a la compresión de cilindros de concreto- Método de prueba. Mayo 2017, Sitio web: <http://www.imcyc.com/ct2008/nov08/PROBLEMAS.pdf>.

Instituto Mexicano del cemento y concreto. (2016). El concreto en la obra, problemas, causas y soluciones. Cementantes Hidráulicos. Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2014. Disponible en: <http://www.imcyc.com/revistacyt/pdf/enero2016/problemas.pdf>. [Consultado en: noviembre 2017].

Juárez, A, C. (2002). Concretos base cemento portland reforzados con fibras naturales (agave lechuguilla), como materiales para construcción en México. (Tesis de Doctorado). Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey; Nuevo León.

Juárez, D. Balart, R. Ferrándiz, S., García, D. (2013). Estudio y análisis de los polímeros derivados del estireno-butadieno. Revista de investigación Editada por Área de Innovación y Desarrollo, S.L. (pp. 2-17).

León, P.M., Ramírez, F. (2010). Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. Revista Ingeniería de Construcción 25: 215-240.

Martínez-Barrera G., Barrera-Díaz C.B., Cuevas-Yáñez E.C., Varela-Guerrero V., Viguera-Santiago E., Ávila-Córdoba L., Martínez-López M., (2015). Waste Cellulose from Tetra Pak Packages as Reinforcement of Cement Concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, pp.1-6.

Morsya. R.M., Ismaielb. M.N., A.A. Yehia. (2013). Conductivity Studies on Acrylonitrile Butadiene Rubber Loaded with different types of Carbon Blacks. *International Journal of Materials, Methods and Technologies* 1: 22 – 35.

Moustafa, B, A. Mounir, R. El Miligy, A.A., Mohamed A.M. (2011). Effect of gamma irradiation on the properties of natural rubber/styrene butadiene rubber blends. *Arabian Journal of chemistry* 9, S124–S129.

Organismo nacional de normalización y organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y la edificación. (2012). Catálogo de Normas. Disponible en: file:///C:/Users/Equipo/Contacts/Downloads/catalogo_de_normas_2012_onncce.pdf. [Consultado en: septiembre 2016].

Oviedo, O. Buendía, R. Ruiz. D, Gómez, A, León, M. (2008). Uso de materiales reciclados para edificaciones: estudio del concreto hidráulico con adición de tiras de caucho de desecho de llanta. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* 18: 1-7.

Özturan T., Çeçen C. (1997). Effect coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths. *Cement and Concrete Research* 27: 165.

Puertas, F., Palacios, M., Manzano, H., Dolado, J.S., Rico, A., Rodríguez, J. (2011) "A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements" *Journal of the European Ceramic Society* 31: 2043-2056.

Quimbay, H. R. (2009). Aplicaciones de la tecnología de control térmico y de madurez del concreto en Colombia. *Noticreto*, 1: 42-47.

Reséndiz, T, V, C. (2007). Estudio de la alternativas de aprovechamiento de las llantas en desuso. (Tesis de licenciatura). Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería. Química e Industrias Extractivas. México, D.F.

Ríos, G, E. (2011). Empleo de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto porcentual del agregado fino en la elaboración de concreto hidráulico. (Tesis de licenciatura). Universidad Veracruzana. Xalapa; Veracruz.

Richardson, E, A. (2006). Compressive strength of concrete with polypropylene fibre additions. *Structural Survey*, 24: 138-153.

Rodríguez, V.M.L. (2013). Propuesta de elaboración del capítulo referente a la granulometría de agregados para el concreto. (Tesis de Maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá D.C.

Rubber Chemistry. (2007). Vulcanization of rubbers. Disponible en: http://laroverket.com/wp-content/uploads/2015/03/rubber_chemistry.pdf. [Consultado en: noviembre 2017].

Schultz, B., Hernández, F., Alonso, M., Bollati, M., Parga, B., Barluenga, G., Benito, C. (2004). Hormigón con fibras de caucho de recuperación de neumáticos usados y de polipropileno diseño del firme de hormigón de caucho. Congreso Nacional de Firmes, pp. 1-15.

Secretaría de comunicaciones y transportes. (2002). Características de los materiales. Materiales para estructuras. Materiales para concreto hidráulico. Calidad del agua para concreto hidráulico. N-CMT-2-02-003/02. [En línea]. [Consultado en: noviembre 2016]. Disponible en: <http://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-2-02-003-02.pdf>.

Sosa, H.E.S., Martínez B.G., Barrera D.C., Cruz, Z.E. (2015). Materiales Reciclados de Llantas Automotrices y la Radiación Gamma en el Mejoramiento del Concreto. *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción*. España: OmniaScience, pp.73-93.

Taylor, H.F.W., (1986). Proposed structure for calcium silicate hydrate gel. *J. Am. Ceram. Soc.* 69: 464-467.

Valadares, F., Bravo, M., De Brito, J., (2012). Concrete with Used Tire Rubber Aggregates: Mechanical Performance. Title No. 109-M26, *ACI Material Journal*, pp.283-292.