

2019

Diseño de un concreto para pavimento utilizando el copolímero SBR, cemento hidráulico y aditivos de alta resistencia.

Ing. Edgar  
Cardenas Castillo



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

Diseño de un concreto para pavimento utilizando el copolímero SBR,  
cemento hidráulico y aditivos de alta resistencia

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro/Doctor en:

Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta

Ing. Edgar Cardenas Castillo

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Querétaro, Qro. A 06 de Junio del 2019



Universidad Autónoma de Querétaro Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Diseño de un concreto para pavimento utilizando el copolímero SBR, cemento hidráulico y aditivos de alta resistencia

Opción de titulación:  
Tesis o publicación de artículo

Que como parte para obtener el Grado de  
Maestro/Doctor en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad.

Presenta  
Ing. Edgar Cardenas Castillo.

Dirigido por:  
Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza.

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza  
Presidente

Dra. Teresa López Lara  
Secretario

Dr. Omar Chávez Alegría  
Vocal

Dr. Francisco Javier García Rodríguez  
Suplente

Dra. Rebeca Guadalupe Ortiz Mena  
Suplente

Centro Universitario.  
Querétaro, Qro, México.  
Junio 2019

## RESUMEN

El concreto es una mezcla debidamente dosificada de agregado grueso (grava), agregado fino (arena), cemento y agua (Montejo A., 2002), sin embargo estos elementos no son limitantes en la composición ya que es posible incorporar otro tipo de materiales que mejoren sus propiedades físicas o mecánicas, los cuales pueden ser utilizados como agregados finos, gruesos o en su defecto, añadirlos en forma de un producto prefabricado como polvo o solución. En este trabajo se estudió el comportamiento de un concreto para pavimento utilizando copolímeros provenientes del reciclado de llantas (Caucho Estireno Butadieno "SBR") teniendo como motivación darle una utilidad a este tipo de materiales que son considerados contaminantes y cuya desintegración varía de los, el cual se dosificó como un porcentaje del agregado fino. Para ello se dividió el trabajo en tres grupos de mezclas (Fase I, Fase II y Fase III) en cada una se comparó con una mezcla convencional o lo que es lo mismo, una mezcla sin utilizar SBR. En la Fase I se usaron diferentes tamaños de partículas, desde SBR de 0.32 mm +- 2cm hasta el uso en forma de polvo, tomando un 7% de SBR del porcentaje del agregado fino con el fin de tener un panorama general del comportamiento del SBR, realizando los ensayos a compresión y flexión en moldes cilíndricos de 15x30cm y rectangulares de 60x15x15cm, respectivamente, ambos a la edad de 28 días. En cuanto a la Fase II y Fase III se utilizaron partículas menores de 4.76 mm (límite entre un agregado fino y uno grueso) y usando moldes cilíndricos de 10x20cm a las edades de 7, 14, 21 y 28 días para compresión y moldes rectangulares de 50x15x15cm a la edad de 28 días a flexión diferenciándose estas fases por el uso de aditivos de alta resistencia y conteniendo mezclas con 5%, 15% y 25% para la Fase I mientras que en la Fase II se manejaron porcentajes de 5% y 25%. Se demostró que las resistencias, tanto a flexión como a compresión en cada una de las Fases analizadas se encuentran en un rango aceptable para el uso en pavimentos y, en consecuencia, contribuye con el reusó de llantas que han cumplido con su vida útil.

**(Palabras clave:** concreto hidráulico, SBR, aditivo fluidificante, huella ecológica, esfuerzo a compresión, esfuerzo a flexión).

## SUMMARY

Concrete is a properly proportioned mixture of coarse aggregate (gravel), fine aggregate (sand), cement and water (Montejo A., 2002), however these elements are not limiting in the composition since it is possible to incorporate other types of materials that improve their physical or mechanical properties, which can be used as fine aggregates, thick or failing, add them in the form of a prefabricated product as a powder or solution. In this work the behavior of a concrete for pavement was studied using copolymers from the recycling of tires (Styrene Butadiene Rubber "SBR") having as motivation to give a utility to this type of materials that are considered polluting and whose disintegration varies from the, which was dosed as a percentage of the fine aggregate. For this, the work was divided into three groups of mixtures (Phase I, Phase II and Phase III) in each one was compared with a conventional mixture or what is the same, a mixture without using SBR. In Phase I, different particle sizes were used, from SBR of 0.32 mm + - 2cm to the use in powder form, taking 7% of SBR from the percentage of the fine aggregate in order to have an overview of the SBR behavior, performing compression and bending tests in cylindrical molds of 15x30cm and rectangular 60x15x15cm, respectively, both at the age of 28 days. Regarding Phase II and Phase III, particles smaller than 4.76 mm (limit between a fine aggregate and a coarse aggregate) were used and using cylindrical molds of 10x20cm at the ages of 7, 14, 21 and 28 days for compression and rectangular molds of 50x15x15cm at the age of 28 days to flexion, these phases being differentiated by the use of high strength additives and containing mixtures with 5%, 15% and 25% for Phase I, while in Phase II, percentages of 5% and 25% were handled. **It was demonstrated that the resistances, both a flexion and compression in each of the phases analyzed, are in an acceptable range for use on the pavement and, in this, the writing of the things that have fulfilled their useful life.**

**(Key words:** hydraulic concrete, SBR, fluidizing additive, ecological footprint, compression stress, bending stress).

A mi familia.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco

Primeramente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo y patrocinio durante la ejecución de pruebas y la redacción de este manuscrito ya que sin su ayuda esta investigación no hubiera llegado a ningún sitio, haciendo hincapié en el apoyo recibido por la Facultad de Ingeniería, en especial al núcleo académico que conforma la División de Investigación y Posgrado de la facultad (DIPFI). A la Universidad de Medellín (UdeM), que con el personal académico consolidaron el tema y aportaron nuevas visiones y directrices, así como por la aportación de materiales y equipo para realizar las pruebas.

En lo particular, correspondo con este agradecimiento al director de esta tesis Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza por el haber encaminado y llevado a buen término esta investigación así como por revisar el texto y externar comentarios para mejorarlo. De la misma manera, agradezco a la Dra. Teresa López Lara, al Dr. Omar Chávez Alegría, Dr. Francisco Javier García Rodríguez y Dra. Rebeca Guadalupe Ortiz Mena por todo el apoyo brindado, por el acompañamiento, cuestionamientos hacia el tema y propuestas para mejorar durante la redacción e investigación.

## Tabla de contenido

	Página
RESUMEN .....	2
SUMMARY .....	3
AGRADECIMIENTOS .....	5
TABLA DE CONTENIDO .....	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	16
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	16
1.3 HIPÓTESIS.....	18
1.4 OBJETIVO .....	18
<b>2. MARCO TEORICO.....</b>	<b>19</b>
2.1 GENERALIDADES DELPAVIMENTO.....	19
2.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS .....	22
2.3 CLASIFICACIÓN DE AGREGADOS (SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS/SUCS).....	23
2.4 MATERIALES RECICLADOS.....	26
2.5 COPOLÍMERO CAUCHO ESTIRENO BUTADIENO (SBR).....	28
2.5.1 PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL COPOLIMERO SBR.....	29
2.5.2 USO DE SBR EN PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	31
2.6 ADITIVOS.....	33
2.7 DOSIFICACIÓN .....	35
2.7.1 MÉTODO ACI .....	36
2.7.2 MÉTODO FULLER – THOMPSON.....	39
2.7.3 MÉTODO BOLOMEY.....	43
2.7.4 MÉTODO FAURY .....	45

<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA, MATERIALES Y EQUIPO .....</b>	<b>53</b>
3.1	DIAGRAMA DE METODOLOGÍA.....	53
3.2	REVISIÓN DE NORMATIVA PARA CONCRETO.....	55
3.3	RECOLECCIÓN DE MATERIAL .....	55
3.3.1	AGREGADOS FINOS YGRUESOS.....	55
3.3.2	CAUCHO ESTIRENO BUTADIENO (SBR).....	56
3.3.3	CEMENTO HIDRÁULICO .....	56
3.3.4	ADITIVOS.....	57
3.4	SEPARACIÓN Y CONTROLDE MATERIALES .....	57
3.5	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	57
3.5.1	AGREGADOS FINOS YGRUESOS.....	57
3.5.2	CAUCHO ESTIRENO-BUTADIENO (SBR).....	58
3.5.3	ADITIVOS DE ALTA RESISTENCIA.....	58
3.6	DISEÑO DE DOSIFICACIONES.....	59
3.6.1	FABRICACIÓN DE LAS MEZCLAS DE LA MATRIZ.....	60
3.6.2	PRUEBAS EN LABORATORIO PARA ESPECÍMENES DE MEZCLAS DE CONCRETO .....	60
3.7	PRUEBAS A ESPECÍMENES.....	61
3.7.1	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN AXIAL. MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	61
3.7.2	RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR FLEXIÓN. MÓDULO DE RUPTURA.....	62
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>62</b>
4.1	COMPARATIVA Y ELECCIÓN DE NORMATIVA VIGENTE .....	62
4.2	MATERIAL RECOLECTADO.....	62
4.3	SEPARACIÓN Y CONTROLDE MATERIALES .....	64
4.4	PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.....	65
4.5	DOSIFICACIONES DE ESPECÍMENES BASE Y MODIFICADA.....	69
4.6	PRUEBAS A FLEXION Y COMPRESIÓN DE CONCRETO PILOTO (FASE I) .....	69
4.7	PRUEBAS A FLEXION Y COMPRESIÓN DE CONCRETO SIN ADITIVOS (FASE II) .....	70
4.8	PRUEBAS A FLEXION Y COMPRESIÓN DE CONCRETO CON ADITIVOS (FASE III) .....	73
4.9	ALIGERAMIENTO DEL CONCRETO FASE II Y FASE III .....	75



<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA .....</b>	<b>77</b>
5.1	CONCLUSIONES.....	77
5.2	LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA.....	78
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>79</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>87</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Página</b>
Tabla 2-1. Materiales constitutivos típicos de los neumáticos .....	30
Tabla 2-2. Contenido de aire atrapado .....	36
Tabla 2-3. Volumen unitario de agua .....	37
Tabla 2-4. Relación Agua – Cemento por resistencia .....	37
Tabla 2-5. Peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto .....	38
Tabla 2-6. Selección de la consistencia del concreto de acuerdo a la compactación .....	40
Tabla 2-7. Asentamientos para diferenciar consistencias del concreto .....	40
Tabla 2-8. Cantidad de agua en kgf por metro cúbico de concreto .....	41
Tabla 2-9. Cambio de las condiciones de la Tabla 2-8 .....	41
Tabla 2-10. Cambio de las condiciones de la Tabla 2-8 .....	42
Tabla 2-11. Valores del coeficiente A de la ecuación de Bolomey .....	44
Tabla 2-12. Valores de B .....	48
Tabla 2-13. Valores de A .....	48
Tabla 2-14. Valores de K .....	49
Tabla 3-1. Matriz de mezclas por FASE .....	54
Tabla 3-2. Normativa de aditivos con base a su funcionalidad .....	59

Tabla 3-4. Objetivos de los especímenes de acuerdo al tiempo de curado del concreto .....	61
Tabla 4-1. Banco de materiales cercanos a la Universidad Autónoma de Querétaro .....	63
Tabla 4-2. Granulometría agregado grueso .....	65
Tabla 4-3. Separación por la malla No.4 .....	66
Tabla 4-4. Testigo de humedad de la fracción que pasó la malla No.4.....	66
Tabla 4-5. Corrección por humedad de la fracción que pasa la malla No.4 .....	66
Tabla 4-6. Relación Abertura de malla – Porcentaje que pasa del material proveniente del banco “La Cañada” .....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 2-1. Carta de Plasticidad</b>	24
<b>Figura 2-2. Configuración de prueba de flexión de tres puntos.</b>	31
<b>Figura 2-3. Resistencia a la compresión (MPa).</b>	32
<b>Figura 2-4. Módulo de elasticidad (Gpa).</b>	32
<b>Figura 2-5. Resistencia a la flexión (MPa).</b>	33
<b>Figura 2-6. Dosificación grafica de agregados método Fuller - Thomson</b>	43
<b>Figura 2-7. Dosificación grafica de agregados método Bolomey</b>	45
<b>Figura 2-8. Representación gráfica de la ecuación de Faury.</b>	46
<b>Figura 2-9. Gráfica para calcular el radio del encofrado “R”.</b>	47
<b>Figura 2-10. Gráfica para la dosificación de agregados por Faury</b>	51
<b>Figura 3-1. Diagrama de flujo “Proceso de la Metodología empleada”.</b>	53
<b>Figura 3-2. Fases de la investigación</b>	54
<b>Figura 4-1. Localización de banco de materiales sobre autopista Querétaro- Tequisquiapan.</b>	63
<b>Figura 4-2. Separación y control de material.</b>	64
<b>Figura 4-3. Tamaño de los agregados.</b>	67
<b>Figura 4-4. Curva granulométrica del banco “La Cañada”</b>	68
<b>Figura 4-5. Prueba a compresión del concreto piloto (Fase I)</b>	69
<b>Figura 4-6. Prueba a flexión del concreto piloto (Fase I)</b>	70

<b>Figura 4-7. Desarrollo de la prueba a compresión del concreto (Fase II )</b>	<b>71</b>
<b>Figura 4-8. Prueba a compresión del concreto sin aditivos (Fase II)</b>	<b>72</b>
<b>Figura 4-9. Prueba a flexión del concreto sin aditivos (Fase II)</b>	<b>73</b>
<b>Figura 4-10. Desarrollo de la prueba a compresión del concreto (Fase III)</b>	<b>74</b>
<b>Figura 4-11. Prueba a compresión por edades del concreto con aditivos (Fase II)</b>	<b>75</b>
<b>Figura 4-12. Prueba a flexión del concreto con aditivos (Fase II)</b>	<b>75</b>
<b>Figura 4-13. Porcentaje de aligeramiento del concreto sin aditivos (Fase II)</b>	<b>76</b>
<b>Figura 4-14. Porcentaje del aligeramiento del concreto con aditivos (Fase II)</b>	<b>76</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

Las carreteras son el factor principal para el desarrollo de una nación, ya que en ellas se transportan pasajeros, materias primas y productos fabricados. De acuerdo a la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (2017), en México la red carretera es la principal vía de transporte, esta cuenta con una longitud de 40 680.65 km pavimentados correspondientes al tramo federal. La necesidad de los diversos actores involucrados en la construcción de vías terrestres por reducir costos en materiales y tiempos de viaje, así como del aumento del uso tránsito en el sistema carretero ha propiciado que se desarrollen nuevas técnicas y productos que satisfagan las especificaciones actuales de cada región.

El desarrollo tecnológico que se dio a partir de 1990 fue determinante para continuar con investigaciones futuras, un ejemplo claro es Soroushian, et al. (1993) pues realizó un informe sobre el uso del látex polimérico fibra de vidrio reforzada de concreto, buscando variar las cantidades del polímero y observando los resultado en la resistencia a flexión, tamaño de grieta y espaciado, limite elástico y el módulo de ruptura bajo diferentes condiciones de envejecimiento; terminando con la conclusión que hay tantos polímeros disponibles y tantas variables esperándolos que es imposible aislar una material en particular y asignarle características particulares a este y sus combinaciones, esto dio pauta a la necesidad de investigaciones más profundas y de mayor calidad.

No obstante, en años anteriores Sprinkel (1988) nos muestra en su investigación la fabricación de concreto con cemento Tipo III en combinación con látex, cuya finalidad era disminuir el tiempo de endurecimiento pues se buscaba utilizarlo en caminos y así disminuir el tiempo para que estuviera en servicio, la complicación que se presento fue que al endurecer rápido el látex no consigue una unión adecuada y provoca agrietamiento temprano.

Por otra parte, Lewis y Lewis (1990) presentan una minuciosa investigación de la tecnología y propiedades de un Compuesto con Matriz Poliméricas (PMC) en Caucho Estireno- Butadieno (SBR) y con modificadores acrílicos. Esta investigación llegó a ser tan relevante ya que presenta una comparación entre los PMC y el concreto sin modificar, además que plantean una técnica para medir la cantidad de polímero en una De acuerdo a Kardon, J.B., et al. (1997), el uso de polímeros naturales en concreto se ha utilizado como refuerzo desde siglos atrás, fabricando paredes con mortero y usando asfalto. Sin embargo, los primeros registros de su uso se remontan a 1909, cuando se le otorgo una patente al estadounidense L.H. Blackland por la incorporación de polímeros en PCC, posteriormente en 1922 el M.E. Varegyas consiguió lo mismo. Mientras esto ocurría en la industria de la construcción, en el sector carretero se tuvo registro un año después, cuando L. Cresson patento la utilización de caucho en el revestimiento de la carpeta; hasta este momento los polímeros que se utilizaban eran naturales, puesto que los sintéticos se inventaron en la década de 1940 y su incorporación a morteros y cemento portland comenzó hasta 1950 (Dikeou 1978, Chandra y Ohama 1994).

En investigaciones más recientes, Bureau, L., et al., (2001) exploraron las respuestas a varios niveles de carga con el fin de establecer una relación entre el polímero y el concreto como en el módulo elástico o la evolución del daño. De la misma forma Ganjian, E., et al., (2009) trabajo con SBR en porciones de 5%, 7.5% y 10% como agregado, dividiéndolos en dos grupos de especímenes, uno con SBR de tiras y otro en polvo. Gesoglu, M., et al., (2014) realizó una mezcla con el agregado natural y tres distintos tamaños de caucho, entre ellos el tiras, polvo y una goma llanta para estudiar las propiedades mecánicas y la permeabilidad, llegando a una conclusión favorable aunque en grados diferentes dependiendo del porcentaje de caucho utilizado, sin embargo el cambio del agregado natural por el caucho aumento su dureza y ductilidad, así como una mejor capacidad de amortiguación. Así mismo, Ghizdavet, Z., et al., (2016) incorporo SBR a una mezcla de concreto para disminuir

el sonido proveniente del ruido del tráfico. Aunque el experimento se enfocó en determinar la absorción acústica en el diseño se presentaron contratiempos como el que existía dificultad para unir el SBR con el concreto. Por otra parte Wang, M., et al., (2016) fabrico un concreto con látex butilbenceno sin aditivos que cubría la superficie de los cristales y rellenaba los poros y grietas; otros con grupos aditivos que reaccionaban con productos de hidratación, el experimento concluyó con que el uso de aditivos mejoraban la resistencia a flexión del cemento modificado.

En estos trabajos se ha mejorado puntualmente alguna de sus propiedades mecánicas tal como el módulo de ruptura, resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, tenacidad, módulo de elasticidad y resistencia a la corrosión mediante el uso de polímeros, Ghizdavet, Z., et al. (2016) demostraron que con el uso de SBR es posible reducir la contaminación acústica, sin embargo en propiedades como la adhesión de los materiales y la compresión tuvieron efectos negativos en todas las edades de hasta 15MPa. En cuanto a la densidad aparente disminuyó tanto con relación agua / cemento como con la cantidad de SBR añadido (de hasta 152 kg / m<sup>3</sup>) mientras que la porosidad aparente experimentó un aumento de hasta 1.8%. Sin embargo, los concretos poseen resistencias a compresión adecuadas para construcciones teniendo un aspecto de granito y sin olor, a pesar de estos buenos resultados este concreto solo puede ser utilizado para interiores pero no soportan cargas extremas.

Existen otros trabajos que mediante el uso de tiras de caucho en el concreto demuestran que el tamaño, la proporción y la textura del SBR afectan la resistencia, un ejemplo claro de ello se encuentra en el trabajo realizado por Herrera Sosa, E.S., et al. (2015) en el cual al añadir SBR se obtuvieron resultados negativos en las propiedades mecánicas en comparación con una mezcla convencional, pero que mediante un tratamiento de radiación Gamma aumentaron la resistencia a compresión, es posible llegar y hasta superar sus resultados mediante la aplicación de aditivos, como lo demostraron Ghizdavet, Z., et al, (2016).



## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las llantas son consideradas un residuo de manejo especial, esto quiere decir que son generados de procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados residuos sólidos urbanos o peligrosos (Diario Oficial de la Federación, 2003). La generación de este residuo oscila las mil toneladas por año durante el periodo 2006 - 2012 en México (Semarnat, 2012). Por otra parte, el convenio de Basilea considera los neumáticos como desechos tóxicos para el medio ambiente, el cual parte como respuesta a la Declaración de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano (Estocolmo, 1972) y que regula estrictamente el movimiento transfronterizo de desechos peligroso, en él se estipulan las obligaciones de los distintos actores para el manejo racional y disposición final (Convenio de Basilea, 2011). A pesar de las diferencias en la clasificación de las llantas, se logra observar la preocupación de las entidades internacionales por hacer frente a la contaminación que generan los neumáticos, tales como problemas de salud pública (propagación de mosquitos y roedores por el estancamiento de agua), incremento del riesgo de incendio al apilar grandes cantidades de llantas o la contaminación al suelo (Golleneche, 2018). Son estas razones que hacen necesario darles una disposición final que colabore a que exista menor contaminación de la industria automotriz.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

El Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018 de la Secretaría de Gobernación (2014), presenta información referente a la inversión hecha en años pasados, en el periodo de 1992 al 2011 el promedio que México invirtió en este rubro fue de 1.10% del producto interno bruto; para el año 2012 el Índice de Competitividad Global del Foro Económico Mundial colocó al país en la posición número 41 de las 144 naciones evaluadas en materia de competitividad de infraestructura de transporte, desafortunadamente en los últimos cinco años este

porcentaje se ha reducido a 1.07%. En este punto es claro que el porcentaje del PIB dirigido a la red carretera en el país está disminuyendo por lo que es necesario optimizar los recursos que se tienen a la mano sin disminuir la calidad de los materiales, en este sentido el uso de materiales reciclados ayudan a minimizar costos sin disminuir la calidad del producto final.

Aunque en la construcción de carreteras siempre se tendrá impactos negativos en el ambiente como la contaminación del aire y el ruido en plantas de producción, pérdida de capa vegetal, modificación del drenaje natural, la explotación de bancos de materiales, así como el manejo y almacenamiento de materiales, existen impactos positivos como el aumento de servicios y el desarrollo económico de la región.

Respecto al uso SBR, existe una gran cantidad de neumáticos considerados desechos (mil toneladas por año durante el periodo 2006 - 2012 en México), puesto que ya cumplieron con su vida útil; se observa que frecuentemente no son aceptados en tiraderos ni rellenos sanitarios ya que son de difícil desintegración y su reciclaje prácticamente es nulo ya que no existe una conciencia ambiental por parte de la sociedad, además que es complicado contactar una empresa especializada en este sector en zonas con un desarrollo urbano limitado. Haciendo una pequeña comparativa en países europeos el reciclado llega a ser del 60% mientras que en México de los 30 millones de llantas el 91% terminan en lotes baldíos, ríos o a orillas de carretera (US Environmental Protection Agency, 1997), a consecuencia de esta situación la población busca eliminar los residuos mediante la quema de llantas.

Sin embargo, la ONU (2011) considera los neumáticos como un desecho peligroso aunque no intrínsecamente peligrosos pues sus componentes no contienen propiedades peligrosas. No obstante, si se manipulan y eliminan inadecuadamente pueden presentar afectaciones tanto al medio ambiente como la

salud pública, por lo que es necesario conocer cómo se comporta el concreto con diferentes proporciones de SBR.

### 1.3 HIPÓTESIS

El uso de cemento hidráulico, SBR y aditivos en un concreto para pavimento ayuda a conseguir mejor adherencia entre los agregados y por consiguiente aumenta la resistencia a flexión arriba de 76.48 kg/cm<sup>2</sup> y a compresión superior a 300 kg/cm<sup>2</sup>.

### 1.4 OBJETIVO

Verificar que la mezcla de concreto cumpla con las normativas americanas y mexicanas vigentes, determinando así el porcentaje de material reciclado apropiado para su diseño.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1 GENERALIDADES DEL PAVIMENTO

Se define como pavimento como la capa o conjunto de capas de materiales apropiados para resistir la acción del tránsito, la exposición al intemperismo y otros factores perjudiciales que afecten la superficie de rodamiento, su color y/o textura (A. Rico et al., 1977). De esta manera, las características funcionales que debe cumplir un pavimento son la resistencia al derrapamiento mediante el empleo de una textura adecuada a la superficie de rodamiento, las características de reflexión luminosa para la conducción nocturna, la regularidad transversal y longitudinal para alcanzar las velocidades de proyecto así como el drenaje y sub-drenaje adecuados, estos últimos evitan que la cantidad de agua que escurre en la superficie de rodamiento sea tanta que produzca el efecto llamado acuaplaneo.

En el momento en que se detecta que no se cumplen con estas características o que los usuarios comienzan a sentirse incómodos se puede asegurar que el pavimento ha perdido su funcionalidad por lo que es necesario intervenir el pavimento para evitar que se continúe deteriorando. Estos deterioros se dan principalmente por la falta de resistencia a la acción del tránsito, por lo que se debe de buscar producir una estructura económica pero que soporte las cargas a las que estará expuesta, tomando en cuenta los costos totales: inversión inicial, conservación y mantenimiento así como los costos de operación según lo expresa el American Concrete Pavement Association, (2012).

El diseño estructural que acompaña al pavimento ha tenido grandes modificaciones, en 1910 se construyó un tramo de 1.7 km en Wayne Country, Michigan constituido de 15 cm de espesor de concreto hidráulico. En 1921 el ingeniero Piero Puricelli diseñó la primera gran carretera del mundo que conectaba Milán y Varese llamada Autostrada A8, considerada así porque fue diseñada para soportar altas velocidades. En 1934 Víctor Lecoq y William Sutherland propusieron

construir una carretera de altas especificaciones explotando la infraestructura ferroviaria existente, usando concreto hidráulico.

Los pavimentos se pueden clasificar en tres grupos, los pavimentos flexibles o asfálticos, pavimentos rígidos o de concreto hidráulico y la combinación de los anteriores, a los que se denominan pavimentos compuestos. A pesar de esta clasificación es complicado diferenciar los conceptos con las características reales de deformaciones en cada tipo de pavimento, así que lo usual es definirlos en términos de los materiales con que se diseñan y de la estructura que los acompañan

Estas deformaciones surgen al ser expuestos a cargas vivas, provocando que las capas de los pavimentos se flexionen que al detener la exposición llegan a recuperarse, sin embargo existe una pequeña parte que no se recupera y que se va acumulando con el paso del tiempo. La parte de la deformación recuperable se le conoce como deformación elástica o temporal y depende del módulo de elasticidad.

Un pavimento rígido es aquel cuyo elemento fundamental es una losa de concreto hidráulico, la cual se coloca sobre una subrasante preparada o sobre una capa intermedia de apoyo ya sea base o sub-base elaborada con materiales granulares o en su defecto estabilizados.

Dentro de esta clasificación podemos diferenciar grupos como los concretos ligeros, que pueden ser concretos con agregado livianos naturales o artificiales. Los primeros hacen referencia a aquellos que están compuestos con piedra pómez, escoria volcánica, diatomita o ceniza volcánica; los segundos son aquellos cuyo agregados son materiales que han sido procesados como lo son las escorias de basura y altos hornos, pizarra, ladrillo triturados. Así mismo existen otro tipo de concretos ligeros los cuales contienen materiales orgánicos como cascaras de arroz o virutas de madera.

El cemento es un material muy noble ya que logra incorporar materiales a su estructura y provoca mejoras en cómo reacciona este, y que dependiendo del uso que se le da a la mezcla es apropiado.

Ya que el principal propósito de un pavimento es servir al tránsito en forma segura, confortable y eficiente, es importante realizar labores de conservación adecuada y oportuna. Para ello es necesario contar con un sistema de gestión de pavimentos para concentrar las operaciones que tienen como objetivo conservar por un período de tiempo las condiciones de seguridad, comodidad y capacidad estructural adecuadas para la circulación, soportando las condiciones climáticas y de entorno de la zona en que se ubica la vía.

El análisis del costo del ciclo de vida (LCCA) se usa para evaluar y comparar el costo para la agencia de un número cualquiera de alternativas de pavimentación, incluyendo una diversidad de soluciones ya sea en hormigón o asfalto. Cuando el LCCA de las alternativas de diseño o de rehabilitación de un pavimento se realiza correctamente, es capaz de identificar la estrategia que entregará el mejor valor y el desempeño esperado al menor costo durante el periodo en análisis, minimizando tanto los costos monetarios así como los sociales y ecológicos según el American Concrete Pavement Association, (2012).

Para que se considere una intervención en un pavimento es necesario que se presenten fallas en él causadas por factores ajenos al pavimento, como lo es el intemperismo, las propiedades constructivas o las propiedades mecánicas de los materiales, y dependiendo del tipo de falla es la intervención que se realizará. El U.S. Department of Transportation, (2014) clasifica estos deterioros en cuatro ramas:

- Cracking
- Deficiencias en juntas
- Deterioros en la superficie
- Otros deterioros

## 2.2 PAVIMENTOS RÍGDOS

Montejo A. (2002) define el concreto como una mezcla debidamente dosificada de agregado grueso (grava), agregado fino (arena), cemento y agua. El uso del concreto en pavimentos se ha realizado en ciudades europeas y en Norteamérica desde principios del siglo XX, actualmente en estos bloques geográficos se desarrollan con mayor velocidad los avances tecnológicos, tanto en el procedimiento constructivo, las pruebas a ejecutar así como de nuevos materiales utilizados en el concreto. Es necesario conocer que elementos conforman un concreto y cuáles pueden ser sus variantes, es por esto que a continuación se muestran cada uno de sus elementos así como una pequeña descripción

### *Cemento Portland o Hidráulico.*

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas define al cemento como un material pulverizado que contiene cal, sílice, alúmina y óxido de hierro, y que forma una pasta conglomerante con la adición apropiada de agua capaz de endurecerse tanto en el agua como en el aire.

Ahora bien, dependiendo el tipo de materia prima que se utiliza para su fabricación es el tipo de cemento que se obtiene. Uno de los cementos más comerciales es el llamado Portland, que a su vez se clasifica en tipo 1, 2, 3, 4 y 5 cuya diferencia entre cada uno de ellos es la proporción de sus componentes, los cuales les da características específicas y a su vez un uso diferente.

### *Agregados finos y gruesos.*

Son considerados la parte estructural del concreto, pues ocupan aproximadamente  $\frac{3}{4}$  del volumen total de la mezcla. Cuando la mezcla está fresca, el agregado se encuentra suspendido en la pasta de cemento, agua y aire, su selección debe de cumplir los requisitos del uso final, sin embargo cuando la mezcla endurece este se confina y reduce la contracción y fluencia de la pasta de cemento;

además que influye en la rigidez, peso, resistencia, propiedades térmicas, adherencia y resistencia al desgaste del concreto. Estos dos elementos generalmente se rigen por las mismas pruebas para su caracterización, las normativas mexicana y americana son muy específicas en este sentido.

### *Agua*

La importancia que tiene el agua en el concreto es debido a que la cantidad de agua utilizada determina la manejabilidad de la mezcla, además que también tiene efecto en la resistencia deseada. Las precauciones para el agua que se emplea esta principalmente enfocada a la limpieza del líquido, libre de contaminantes como aceites, ácidos, álcalis, materia orgánica u otras sustancias nocivas para el concreto ACI 301.

## 2.3 CLASIFICACIÓN DE AGREGADOS (SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS/SUCS)

La clasificación de suelos representa la selección de los materiales mediante sus características mecánicas, categorizándolos únicamente como rocas, fragmentos de roca y suelos. Estas rocas hacen referencia a formaciones rocosas continuas y de gran magnitud.

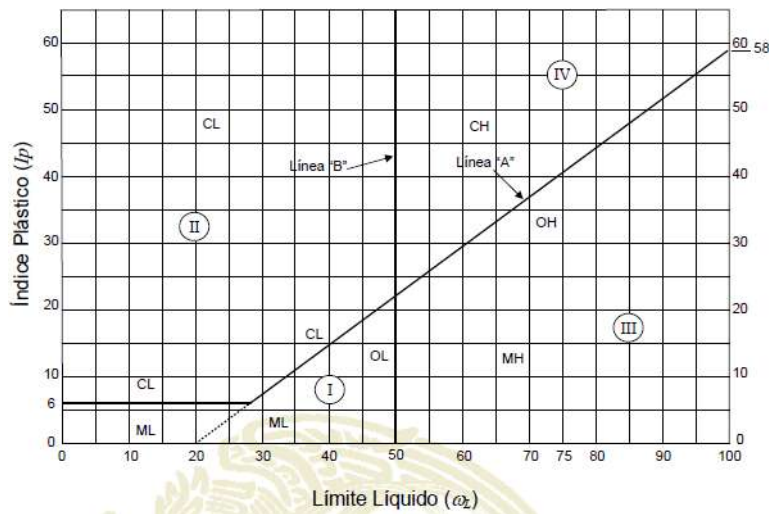
La clasificación de los fragmentos de roca se da en función del tamaño existente de las rocas, de acuerdo a la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) estos materiales se usan principalmente en terracerías debido al tamaño de sus partículas, en la norma M-MMP-1-02/03, SCT, dicha clasificación se expresa:

- Fragmentos de roca grandes: Cuya dimensión máxima es mayor de 75 cm y menor a 200cm.



- Fragmentos de roca medianos: Fragmentos comprendidos entre los 20 cm y 75 cm.
- Fragmentos de roca chicos: Fragmentos mayores a 7.5 cm o lo que es lo mismo, retenidos en la malla de 3" pero menores a 20 cm.

Dentro de esta clasificación (SUCS) se brinda una tipología de materiales mediante la granulometría del suelo. El fundamento de esta clasificación se basa en la carta de plasticidad que desarrolló Casagrande (Figura 2-1), realizada en función de las características de plasticidad, y las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos.



**Figura 2-1. Carta de Plasticidad**  
 Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Por último, la clasificación de suelo se da a todos los materiales que pasan la malla de 3", sin embargo se subdividen en suelos gruesos y suelos finos, distinguiéndose entre sí por el cribado de la malla No. 200.

Los suelos gruesos tienen una división en dos tipos, los cuales son gravas y arenas (cuya simbología es G y S respectivamente). Se considera como grava

aquellos materiales donde más del 50% de la fracción gruesa es retenida en la malla No. 4, y las arenas son aquellas donde más del 50% de la porción gruesa pasa la malla No. 4 pero que es retenida en la malla No. 200.

Grupo GW y SW: Suelos bien graduados donde el contenido de partículas finas no es mayor del 5% en peso, con un coeficiente de uniformidad (Cu) mayor de 4 y un coeficiente de curvatura (Cc) entre 1 y 3.

- Grupo GP y SP: Suelos mal graduados, donde su apariencia es uniforme dado que predomina un solo tamaño, esta clasificación se da porque no se satisface la clasificación para un material GW o SW.
- Grupo GM y SM: Suelos con alto contenido de finos, afecta las características de resistencia, esfuerzo-deformación y la capacidad de drenaje libre de la fracción gruesa; su porcentaje de finos es mayor al 12% en peso, con un índice de plasticidad menor que el 6%. Si el porcentaje de finos esta entre 5% y 12% se deberá usar un símbolo doble.
- Grupo GC y SC: Suelos con porcentaje de finos mayor del 12% en peso, siendo finos de media a alta plasticidad, con índice plástico mayor que 6%. Si el material no se ubica claramente en un grupo debe clasificarse con un símbolo doble.

Los suelos finos son aquellos que pasan por la malla No. 200, como las arcillas inorgánicas de símbolo clay (C), limos inorgánicos con símbolo (M) o limos y arcillas orgánicas (O), sin embargo estos tres grupos mencionados con anterioridad se dividen en dos subgrupos cada uno, y se realiza mediante el límite líquido, menor del 50% para así tener un símbolo L (low compressibility), y con un límite líquido mayor del 50% se tiene H (high compressibility), por otro lado suelos con alta presencia de materia orgánica, extremadamente compresibles forman un grupo denominado turba (Pt).

- Grupos CL y CH: Las arcillas de baja plasticidad (CL), comprende a la zona sobre la línea A de la carta de plasticidad, conteniendo un límite líquido (LL) menor del 50%, con índice plástico (IP) mayor al 6%. Mientras que el grupo de las arcillas de alta plasticidad (CH) corresponden por arriba de la zona de la línea A, con un LL mayor del 50%.
- Grupos ML y MH: Los limos de baja plasticidad (ML), comprenden a la zona por debajo de la línea A, con un LL menor del 50%, y con IP menor del 6%, mientras que los limos de alta plasticidad (MH) están dentro de la zona correspondiente a un LL mayor del 50%.
- Grupos OL y OH: Los suelos orgánicos, corresponden a la misma zona que los ML y MH, sin embargo, por la cantidad de materia orgánica hacen que carezcan el límite líquido de una arcilla inorgánica y sin apreciable cambio en índice plástico, lo que hace que se desplace hacia la derecha en la carta de plasticidad.
- Grupo Pt: Los suelos turbosos suelen tener un límite líquido entre 300% y 500%, su índice plástico normalmente varía entre 100% y 200%, quedando debajo de la línea A de la carta de plasticidad.

## 2.4 MATERIALES RECICLADOS

En este apartado hablaremos de aquellos materiales que se han utilizado dentro de la mezcla de concreto con la finalidad de incrementar las propiedades físicas, mecánicas o por el simple hecho de disminuir la contaminación del medio ambiente. Por lo que en este texto se toman dos ramas de materiales a reciclar, los orgánicos y los inorgánicos. Tomando como contexto el panorama internacional del uso de materiales reciclados, por ejemplo, la industria de la construcción en México ha presentado un incremento en cuanto al PIB, por lo que además de considerarla polo de desarrollo es inevitable señalar que es una de las industrias que contribuyen en mayor medida a la contaminación y generación de problemas ambientales. Por fortuna de todos, aun cuando se genera un gran porcentaje de contaminación es

posible incorporar estos desechos en infinidad de actividades y productos utilizados, así como los residuos producidos por la industria agroalimentaria (Gregova et. al., 2006), entre otras.

Llamamos materiales orgánicos a aquellos que contienen generalmente carbono, hidrógeno, oxígeno y con menor frecuencia, nitrógeno, azufre y fósforo, además que se descomponen con facilidad por el calor, son solubles en disolventes orgánicos como el éter, alcohol, benceno entre otros. En la vida cotidiana diferenciamos a los materiales orgánicos como los provenientes de componentes orgánicos provenientes de restos de organismos que estuvieron vivos como plantas o animales.

Zavala et al. (2015) usaron residuos agroindustriales para estabilizar el adobe de una casa habitación, llegando como resultado que al incorporar un tamaño controlado de fibra en la matriz del adobe, un contenido de aserrín al 10%, se incrementa la resistencia a la compresión en 24.12% con un valor de 8.51 MPa. La resistencia a la flexión, en muestras con aserrín con bagazo al 10%, se generó un incremento de 7.86% con respecto al adobe tradicional, obteniendo un valor de 0.60 MPa.

Un material inorgánico es aquel que no proviene de células animales, vegetales o relacionadas al carbono. Entre los materiales utilizados con mayor frecuencia en construcción se encuentran minerales, cemento, vidrio y cerámica. Frecuentemente estos materiales pueden reutilizarse en otros procesos para mejoras de distintas propiedades.

Hernández-Zaragoza et al (2015), realizaron un mortero reparador con base de poliéster y lo aplico en estructuras de concreto dañadas consiguiendo fungir como un método de reparación para construcciones dañadas, además que este material sirve de impermeabilizante, dándole un valor agregado. Por otra parte Concha-Guzmán et al. (2015) lograron utilizar cerámicos de reciclaje como sistemas

inteligentes de protección contra la corrosión y de esta manera darle un valor agregado convirtiéndolo así en un sistema más amigable con el ambiente.

De la misma manera Viveros-Aguirre et al. (2015) mejoraron algunas propiedades mecánicas y electroquímicas de un concreto reforzado mediante la aplicación materiales poliméricos como el nylon y el unicel en forma de solución consiguiendo que la resistencia mecánica, las muestras con agregados de nylon fue superior a las convencionales, mientras que en las pruebas electroquímicas el comportamiento de las muestras con los dos agregados fue variable.

El uso de politereftalato de etileno (PET) en concreto es mucho más común de lo que pareciera en la industria de la construcción, un ejemplo de ello es el que le dieron Ávila-Córdoba et al., (2015) donde sustituyeron el agregado fino (arena) en la mezcla de concreto utilizando la radiación gamma como método para el reuso de este material. De la misma forma el uso del tetra pack ha sido investigado con frecuencia en la manera como se desempeña en una mezcla de concreto, Martínez-López et al., (2015) analizaron la resistencia a compresión y a la flexión llegando a la conclusión que utilizar las partículas de tetra pack disminuye las propiedades mecánicas (6% la resistencia a compresión y 0.1% la resistencia a flexión) con respecto a una mezcla convencional.

## 2.5 COPOLÍMERO CAUCHO ESTIRENO BUTADIENO (SBR)

A pesar de las fallas que se han presentado en algunas de las investigaciones, algunas de ellas pueden aplicarse ya que se compararon mezclas convencionales con aquellas que contenían aditivos, además de proponer tratamientos que funcionaron para aumentar las propiedades físicas y mecánicas del concreto. Para el diseño de la metodología a emplear se basará en las investigaciones realizadas por los siguientes autores ya que sus objetivos se asemejan a los que se pretenden conseguir en este documento.

En Herrera Sosa, E.S., et al., (2015) buscaron fabricar una mezcla de concreto reforzado con SBR para su uso en la industria de la construcción, aplicando radiación Gamma para mejorar la resistencia a compresión. Aun cuando los resultados que se obtuvieron fueron positivos, para aplicar estas técnicas al diseño de concreto para pavimentos se convierte en limitante pues las reacciones químicas que libera la radiación dependen directamente de los rayos Gamma que se le aplicaba.

Ghizdavet, Z., et al., (2016) pretendían disminuir la contaminación acústica provenientes del tránsito, además de conseguir el objetivo su metodología permitió valorar propiedades como el módulo elástico, la resistencia a la compresión, densidad aparente, adhesión de los componentes y la porosidad.

Como material compuesto el concreto se compone de agregados de diferentes graduaciones o rellenos incrustados en una matriz endurecida de material cementoso (Zongjin, L., 2011). Por su parte, Li, J., et al. (2017) nos dicen que en China para que un concreto sea considerado de alta resistencia debe ser mayor a 60 MPa, los resultados obtenidos por Herrera Sosa, E.S., et al., (2015) nos muestran que la resistencia máxima a compresión que se obtuvo de su experimentación fue de 30 MPa, por lo que es factible encontrar un valor entre estas dos cantidades.

### *2.5.1 PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL COPOLIMERO SBR*

La diferencia entre la acción de reciclar y reutilizar un material radica principalmente en que el reciclaje procesa el material usado para convertirlo en uno similar y usarlo nuevamente, mientras que la reutilización se refiere a usar tal y como se encuentra el material en una situación específica (Ortiz, 2008). El concepto al que es sometido el SBR es el reciclado, puesto que las llantas de neumático son procesadas para conseguir la materia en las dimensiones y elementos necesarios.

La Tabla 2-1 muestra los componentes que utilizaron Ganjian, E., et al., (2009) de una llanta de automóvil y una de camión, revisando estos porcentajes da una idea clara de los componentes que es necesario eliminar, en otras palabras, separar el caucho de cualquier otro elemento.

**Tabla 2-1. Materiales constitutivos típicos de los neumáticos**

<b>Composición</b>	<b>Neumático de automóvil (%)</b>	<b>Neumático de camión (%)</b>
Caucho natural	14	27
Caucho sintético	27	14
Carbono negro	28	28
Tela, aceleradores de relleno y antiozonantes	16-17	16-17
Acero	14-15	14-15

*Fuente: Ganjian, E., et al., (2009).*

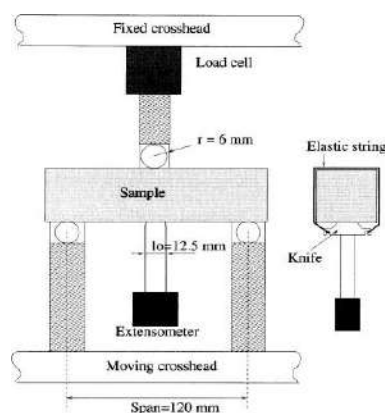
Teniendo el conocimiento la composición de un neumático, para reciclar las llantas y obtener SBR de ellas es necesario seguir la serie de pasos que Herrera Sosa, E.S., et al., (2015) describe:

- Destalonamiento: Remoción de los alambres de acero.
- Desmetalización: Remoción de partículas ferromagnéticas de los demás materiales. Se remueve el 99% del acero por medio de un separador magnético.
- Trituración: Reducción volumétrica de llantas a trozos pequeños, se divide en dos fases (trituration primaria y secundaria).
  - Trituración primaria: Trozos de llantas grandes y no uniformes.
  - Trituración secundaria: Reducción de los trozos de llantas hasta obtener tamaños entre 20 mm y 100 mm.
- Granulación primaria: Reducción volumétrica de los trozos de llantas en grano, hasta obtener tamaños menores a 20 mm.

Ahora bien, al elegir un polímero soluble en el agua que retarde la floculación se tiene que cuidar que no minimice la formación de una capa rica en agua alrededor las superficies agregadas, también proporcionar una distribución más uniforme de partículas de cemento no hidratadas en la matriz (Knapen y Van Gemert, 2011).

### 2.5.2 USO DE SBR EN PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Las principales pruebas que se han realizado son para medir el esfuerzo a compresión, esfuerzo a flexión y el módulo de elasticidad. La compresión estándar y las pruebas de flexión de tres puntos son comúnmente utilizadas para caracterizar el rendimiento mecánico de estas mezclas, tal como lo realizaron Parghi, A. y Shahria, M.A. (2016) y Herrera Sosa, E.S., et al., (2015). Cualquiera que sea la relación polímero-cemento, mantienen su dispersivo quebradizo comportamiento y, en el clásico control de velocidad de cruceta condiciones de prueba: fuerza para la ruptura es a menudo la única propiedad mecánica accesible en la Figura 2-2 se presenta.



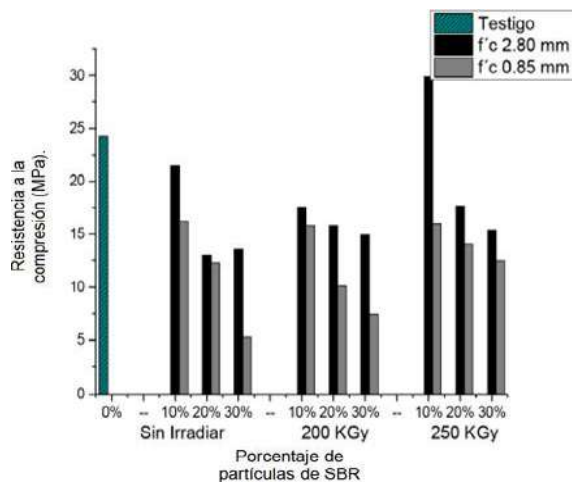
**Figura 2-2. Configuración de prueba de flexión de tres puntos.**

*Fuente: Martínez Barrera, G., et al., (2015).*

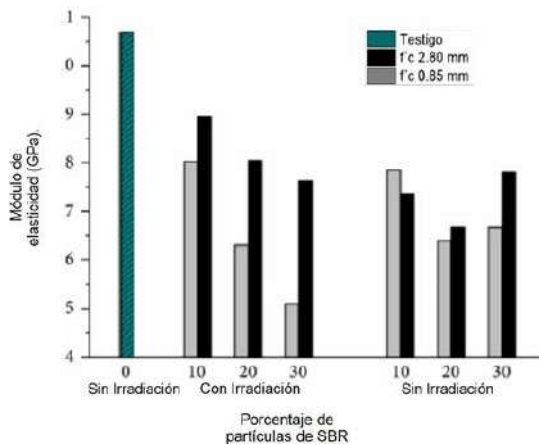
En la investigación realizada por Herrera Sosa, E.S., et al., (2015) se observa que existe una disminución en las propiedades mecánicas del concreto cuando se añade partículas de llantas recicladas, pero al aplicar ciertos tratamientos como lo



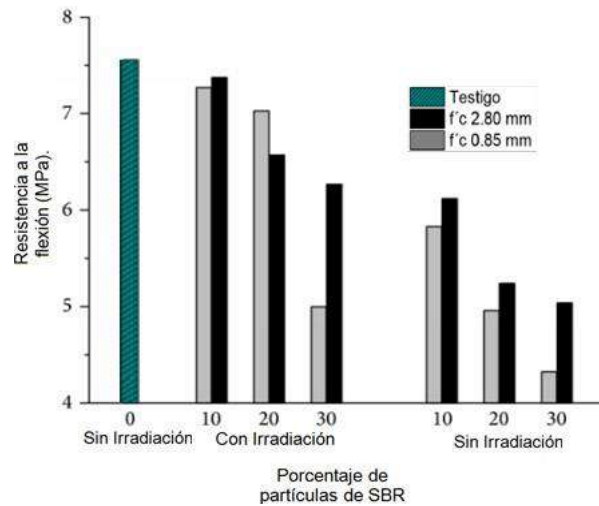
es la radiación Gamma se mejoran estas propiedades. Los resultados obtenidos con estos tratamientos se muestran en las Figuras 2-3, 2-4, 2-5; al analizarlos logra identificar que los tamaños de las partículas afectan las resistencias a compresión y a flexión del concreto.



**Figura 2-3. Resistencia a la compresión (MPa).**  
 Fuente: Martínez Barrera, G., et al., (2015).



**Figura 2-4. Módulo de elasticidad (Gpa).**  
 Fuente: Herrera Sosa, E.S., et al., (2014).



**Figura 2-5. Resistencia a la flexión (MPa).**  
*Fuente: Herrera Sosa, E.S., et al., (2014).*

## 2.6 ADITIVOS

Los aditivos son materiales diferentes a cualquier componente convencional del concreto, no se consideran componentes esenciales de la mezcla. Los cuales se agregan en pequeñas cantidades con el fin de modificar una o más de las propiedades del concreto fresco, fraguado, endureciéndose o ya endurecido. Otro de los motivos para usar aditivos es para disminuir el coste de la mezcla, pero no deben de cambiar las condiciones de trabajabilidad y durabilidad.

El ACI 318-05 clasifica los aditivos en cinco grupos, dependiendo de los efectos que se buscan estos pueden ser:

- Reductores de agua, retardantes o acelerantes.
- Cenizas volantes u otras puzolanas.
- Escoria molida granulada de alto horno
- Con concreto expansivo.
- Humo de sílice

A diferencia de la A.C.I. la A.S.T.M 494 no consideran como aditivos los suplementos del cemento como la escoria, puzolanas naturales, humos de sílice ni las fibras para refuerzos; la clasificación de la A.S.T.M al igual que en la norma mexicana (NMX) toman tipos de aditivos:

- Tipo A. Reductores de agua. Genera mayores resistencias con la misma cantidad de cemento lo que a su vez propicia ahorros al hacer el concreto. Sus beneficios en estado plástico es la mejora de la trabajabilidad, cohesión y reduce la tendencia de la segregación, mientras que en estado endurecido aumenta la resistencia a la compresión axial y a la flexión, mejora la adhesión al acero y reduce la aparición de agrietamiento.
- Tipo AA. Inclusor de aire. Se usa como protección de concreto expuesto al aire libre a causa de congelamiento.
- Tipo B. Retardadores de fraguado. Actúa como agente de forma controlada y cuya dosificación se logra en un tiempo de hasta 30 horas.
- Tipo C. Aceleradores de fraguado inicial. A diferencia del anterior, este acelera el tiempo de fraguado y la resistencia a la compresión axial, si pueden combinar perfectamente con inclusores de aire, aditivos superplastificantes y aditivos reductores de agua.
- Tipo C2. Acelerantes de resistencia. Similar al Tipo C pero con la diferencia de que se utiliza en tiempo después del fraguado inicial.
- Tipo D. Reductor de agua y retardante. Genera una mejor plasticidad y fluidez por lo que es preferible su uso en climas cálidos, para concretos que se trasladan a largas distancias, tiene facilidad del bombeo y aumenta la durabilidad.
- Tipo E. Reductor de agua y acelerante. Mejora las propiedades plásticas y de

endurecimiento del concreto como la resistencia a compresión, a flexión y la trabajabilidad. Su aplicación se recomienda en climas fríos, para concreto estructural o fabricación de tubos de concretos.

- Tipo F. Reductor de agua de alto rango. Especial para concreto prensado o postensado
- Tipo F2. Superplastificante.
- Tipo G. Reductor de agua de alto rango y retardante. Como lo dice su nombre es especial para extender el tiempo a temperaturas altas.
- Tipo G2. Superplastificante y retardante.

## 2.7 DOSIFICACIÓN

Existen una gran cantidad de software donde se puede conseguir las dosificaciones de un concreto insertando algunos valores referentes a los elementos utilizados, a pesar de que es una herramienta que ayuda a hacer más, es necesario conocer las bases científicas mediante se diseñaron los programas. Es por esto que en este apartado se describen los métodos más utilizados y representativos entre los cuales se hacen mención:

- Método ACI
- Método Fuller- Thompson
- Método Bolomey
- Método Faury

A pesar que existen estos algoritmos para el diseño y dosificación de un concreto, al momento de fabricarlo en campo, se cometen errores que provocan la falla del pavimento, puesto que utilizan métodos empíricos basados en dosificaciones provenientes principalmente del fabricante de cemento, donde entrega una dosificación basada en la relación agua-cemento, sin considerar los

resultados obtenidos de pruebas como la caracterización de agregados finos y gruesos, de los cuales se ha mostrado su importancia en temas anteriores.

### 2.7.1 MÉTODO ACI

Método empírico realizado por organizaciones como el American Concrete Institute (ACI) y el Portland Cement Association (PCA). El procedimiento de diseño consiste en calcular el peso del cemento y con base a ello se calcula los pesos de los elementos restantes, tomando en cuenta que se diseña para un metro cúbico de concreto. Este método se puede programar con facilidad para realizar modificaciones en cuanto al volumen final que se necesite.

Paso 1. Selección de los datos particulares de la mezcla a diseñar, entre ellos la resistencia del concreto, el peso específico del agua y de los agregados.

Paso 2. Caracterización de los agregados. Se trata de determinar mediante pruebas de laboratorio los pesos unitarios sueltos y compactados, peso específico, módulo de finura, tamaño máximo nominal, porcentaje de absorción y el porcentaje de humedad

Paso 3. A continuación se calcula la resistencia promedio requerida, primeramente se obtiene el porcentaje de aire atrapado dependiendo del tamaño máximo nominal del agregado grueso (Tabla 2-2), posteriormente se obtiene la resistencia tomando como guía la Tabla 2-3, en caso de que no se encuentre la resistencia en esta tabla, es necesario interpolar los valores:

**Tabla 2-2. Contenido de aire atrapado**

<b>Tamaño máximo nominal del agregado grueso (in)</b>	<b>Aire atrapado (Porcentaje)</b>
3/8"	3.00%
1/2"	2.50%
3/4"	2.00%
1"	1.50%

1 1/2"	1.00%
2"	0.50%
3"	0.30%
4"	0.20%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-3. Volumen unitario de agua

Asentamiento (in)	Agua en l/m <sup>3</sup> para los tamaños máximos nominales d agregado grueso y consistencia indicada (in).							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
<b>Concreto sin aire incorporado</b>								
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	...
<b>Concreto con aire incorporado</b>								
1" a 2"	181	175	168	169	150	142	122	107
3" a 4"	202	193	184	175	165	157	133	119
6" a 7"	216	205	197	184	174	166	154	...

Fuente: Comité 211 del A.C.I.

Paso 4. Se calcula la relación Agua – Cemento con la Tabla 2-4, entrando con la resistencia del concreto y seleccionando si es una mezcla con o sin aire incorporado, de ser necesario se interpola para obtener el valor deseado.

Tabla 2-4. Relación Agua – Cemento por resistencia

F'c (Kg/cm <sup>2</sup> )	Relación agua/cemento en peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
150	0.80	0.71
200	0.70	0.61
250	0.62	0.53
300	0.55	0.46
350	0.48	0.40
400	0.43	...
450	0.38	...

Fuente: Comité 211 A.C.I.

En este punto si lo desea se puede calcular el contenido de agua por bolsa de cemento.

Paso 5. A continuación se obtienen los pesos del agregado grueso y fino, el primero apoyándose en la Tabla 2-5 interpolando los datos si es necesario y el segundo restando del peso del agregado grueso, el cemento, el agua y el aire de la unidad.

**Tabla 2-5. Peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto**

<b>Tamaño máximo nominal del agregado grueso (in)</b>	<b>Volumen de agregado grueso, seco y compactado por unidad de volumen del concreto para diversos módulos de fineza del fino.</b>			
	<b>2.40</b>	<b>2.60</b>	<b>2.80</b>	<b>3.00</b>
3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	0.76	0.74	0.72	0.70
2"	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	0.81	0.79	0.77	0.75
6"	0.87	0.85	0.83	0.81

*Fuente: Comité 211 del A.C.I.*

Paso 6. Se hace una corrección por humedad en los agregados gruesos y finos con la formula

$$\text{Corrección} = \text{Peso agregado} * ((\text{porcentaje de humedad} / 100) + 1)$$

Paso 7. Se obtiene el aporte de agua a la mezcla por agregado mediante la fórmula:

Paso 8. A continuación se calcula el agua efectiva mediante la sustracción de la cantidad de agua en el diseño en estado seco menos el aporte del agua a la mezcla.

Paso 9. Se realiza el proporcionamiento de la mezcla tomando como base un kilogramo de cemento, a partir de ahí obtener los volúmenes de los demás componentes del concreto.

Paso 10. Para terminar se realiza el cálculo de los volúmenes totales que se utilizaran para rellenar los moldes con mezclas.

### 2.7.2 MÉTODO FULLER – THOMPSON

Método creado por Fuller y Thomson, el cual consiste en seleccionar una curva granulométrica continua para la composición óptima de los agregados del concreto. Dicha curva proviene de la ecuación  $Y = 100 (d/D)^{0.5}$  donde la variante Y representa el porcentaje en peso del agregado que pasa a través del tamiz con abertura d, y d es el tamaño máximo del agregado. Es recomendable usar este método de diseño cuando se presentan los siguientes casos:

- Diseño para concreto superior a los 300kgf
- Se utilizará para una estructura que no está fuertemente estructurada.
- El tamaño máximo del agregado grueso se encuentra entre 2" y 3/4" (de 50 +- 20 mm)
- Los agregados gruesos tienen forma redondeada

#### *Procedimiento*

Paso1. Selección de la consistencia del concreto. Dependiendo de la compactación del concreto en campo se elegirá dependiendo la consistencia y principalmente el fin que tendrá la mezcla (Tabla 2-6):



**Tabla 2-6. Selección de la consistencia del concreto de acuerdo a la compactación**

<b>Utilización</b>	<b>Tipo de compactación</b>	<b>Consistencia</b>
Bombeo y concreto fuertemente armado	Picado con barra	Blanda / Fluida
Prefabricados, (estructuras masivas)	Vibro compactación	Seca
Concreto normal	Vibración normal	Plástica

*Fuente: Adaptado de Giraldo Bolívar (1987).*

Posterior a esto, se selecciona el asentamiento el porcentaje de fluidez de acuerdo a la consistencia del concreto (Tabla 2-7):

**Tabla 2-7. Asentamientos para diferenciar consistencias del concreto**

<b>Consistencia</b>	<b>Asentamiento (cm)</b>	<b>Fluidez (%)</b>
Seca	0 – 2	0 -40
Plástica	2 – 5	40 – 70
Blanda	5 – 11	70 – 100
Fluida	11- 20	100 - 130

*Fuente: Adaptado de Giraldo Bolívar (1987).*

Paso 2. Estimación del tamaño máximo del agregado. Se realiza de la misma manera que en el método del A.C. I. con una pequeña variante, ya que el tamaño máximo del agregado se define como la menor cobertura del tamiz que retiene menos del 15% del peso total del agregado.

Paso 3. Determinación de la cantidad de agua de la mezcla. En la tabla 2-8 se muestra cuando el concreto contiene agregados de granulometría y propiedades físicas promedios y con una relación agua/cemento de 0.57 y con un asentamiento de 76 mm. En la Tabla 2-9 se muestran las correcciones para modificar los valores dados en la Tabla 2-8 si es que existiera variación de las condiciones supuestas.

**Tabla 2-8. Cantidad de agua en kgf por metro cúbico de concreto**

<b>Tamaño máximo del agregado (mm/in)</b>	<b>Agregado redondeado (Kgf)</b>	<b>Agregado triturado (kgf)</b>
12.7	199	214
19.1	184	199
25.4	178	193
38.1	166	181
50.8	157	172
76.2	148	163
152.4	131	145

*Fuente: Adaptado de Giraldo Bolívar (1987).*

**Tabla 2-9. Cambio de las condiciones de la Tabla 2-8**

<b>Cambio de las condiciones en la Tabla 2.1</b>	<b>Modificación en la cantidad de agua (Porcentaje)</b>
Por cada 25 mm de aumento o disminución en el asentamiento	+ - 3%*
Arenas trituradas	+ 6.8%
Concreto poco manejable	- 3.6 %

\*El signo + indica aumento mientras que el signo – disminución del contenido de agua en la mezcla.

*Fuente: Adaptado de Giraldo Bolívar (1987).*

Paso 4. Resistencia de diseño. Igual al método A.C.I.

Paso 5. Relación Agua-cemento. Igual al método A.C.I.

Paso 6. Determinación de los porcentajes de agregados en la mezcla.

La curva que toma este método como referencia para combinar los agregados es:

$$Y = 100 (d/D)^{0.5}$$

Donde

D = tamaño máximo

D = abertura de las mallas.

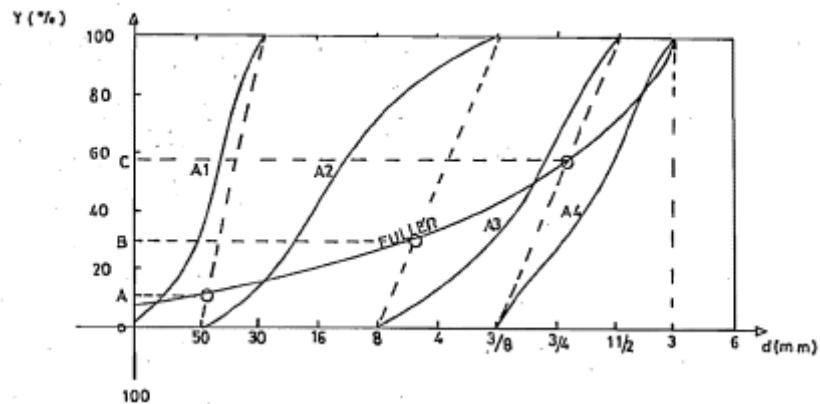
Así pues tenemos los valores que se muestran en la Tabla 2-10 para los diferentes tamaños máximos.

**Tabla 2-10. Cambio de las condiciones de la Tabla 2-8**

d (mm/in)	Valores de Y para diferentes tamaños máximos (D)					
	12.5 (1/2")	20 (3/4")	25 (1")	40 (3/2")	50 (2")	63.5 (2 1/2")
63.5 (2 1/2")	-	-	-	-	-	100
50 (2")	-	-	-	-	100	89
40 (3/2")	-	-	-	100	85.6	77
25 (1")	-	-	100	81.6	70.7	63
20 (3/4")	-	100	86.5	71	61	55
12.5 (1/2")	100	81	70	57	50	44
9.5 (3/8")	87	71	61	50	43	39
4.8 (No.4)	62	50	43	35	31	27
2.4(No.8)	44	35	31	25	22	19
1.2 (No. 16)	31	25	22	18	15	14
0.6 (No.30)	22	18	15	12.5	11	9.7
0.3 (No. 50)	15	12.5	11	8.8	7.7	6.9
0.15 (No.100)	11	8.8	7.7	6.2	5.4	4.8

*Fuente: Adaptado de Giraldo Bolívar (1987).*

El porcentaje en peso de agregado para mezclar se obtiene con la Figura 2-6 en donde se unen con rectas los tamaños máximos y mínimos de agregados consecutivos.



**Figura 2-6. Dosificación gráfica de agregados método Fuller - Thomson**  
*Fuente: Giraldo Bolívar (1987).*

El punto donde estas rectas se intersectan la curva de Fuller en el eje de las abscisas es el % en volumen del agregado combinado. Teniendo esta combinación se realiza un primer cálculo para posteriormente hacer los ajustes necesarios.

Paso 7. Dosificación por metro cúbico. Ya obtenidos los porcentajes de agregados que forman parte de la mezcla, se calcula el volumen necesario para un metro cubico de concreto. Hay que considerar que el volumen absoluto de cemento + agua es inferior al volumen absoluto de cemento y agua, ya que en el proceso de unión se pierde volumen de las partes, teniendo esto en cuenta, el volumen absoluto será de 1025 dm<sup>3</sup>.

### 2.7.3 MÉTODO BOLOMEY

El método propuesto por Bolomey en 1925 es muy similar al de Fuller-Thomson, ya que propone una curva granulométrica continua de agregado más cemento, pero con la diferencia que en ella le da mayor importancia a la dosificación de concreto en grandes cantidades, es decir, para construcciones de presas, moros de gravedad, vertederos, entre otros.

*Procedimiento.*

Paso 1. Selección de la consistencia del concreto. Igual al método Fuller-Thomson

Paso 2. Selección del tamaño máximo del agregado. Igual al método Fuller-Thomson

Paso 3. Determinación del contenido de agua. Igual al método Fuller-Thomson.

Paso 4. Cálculo de la resistencia de la mezcla. Igual al método Fuller-Thomson

Paso 5. Relación Agua – Cemento. Igual al método Fuller-Thomson.

Paso 6. Contenido de cemento. Igual al método Fuller-Thomson.

Paso 7. Proporciones de los agregados. La curva granulométrica en este método

$$Y = A + (100 - A) * ((d / D) ^ 0.5)$$

Dónde:

Y = Porcentaje que pasa acumulado por la malla de abertura d.

d = Abertura de las mallas en mm o in.

D = Tamaño máximo del agregado total en mm o in.

A = Coeficiente dependiente de la forma del agregado y consistencia del concreto y la cual puede obtenerse de la Tabla 2-11.

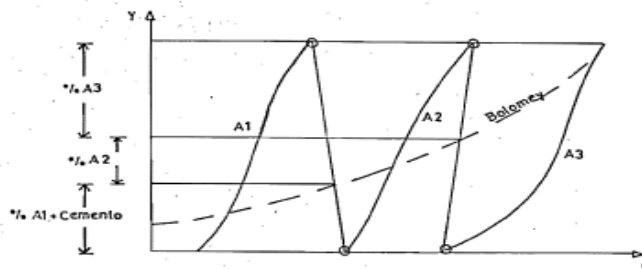
**Tabla 2-11. Valores del coeficiente A de la ecuación de Bolomey.**

<b>Tipo de agregado</b>	<b>Consistencia</b>	<b>Asentamiento (cm)</b>	<b>A</b>
Redondeado	Seca – Plástica	0 – 5	10
	Blanda	5 – 10	11
	Fluida	10 – 20	12
	Seca – Plástica	0 – 5	12

Triturado	Blanda	5 – 10	13
	Fluida	10 – 20	14

Fuente: Adaptado de

La forma más rápida para obtener las dosificaciones es mediante la gráfica presente en la Figura 2.7 en la cual, al igual que en el método anterior que para un primer tanteo se escoge un porcentajes de material presente en el eje de las ordenadas (Y) y que representan los puntos donde cortan la línea de los tamaños máximos y mínimos de dos agregados consecutivos.



**Figura 2-7. Dosificación gráfica de agregados método Bolomey**  
Fuente: Giraldo Bolívar (1987).

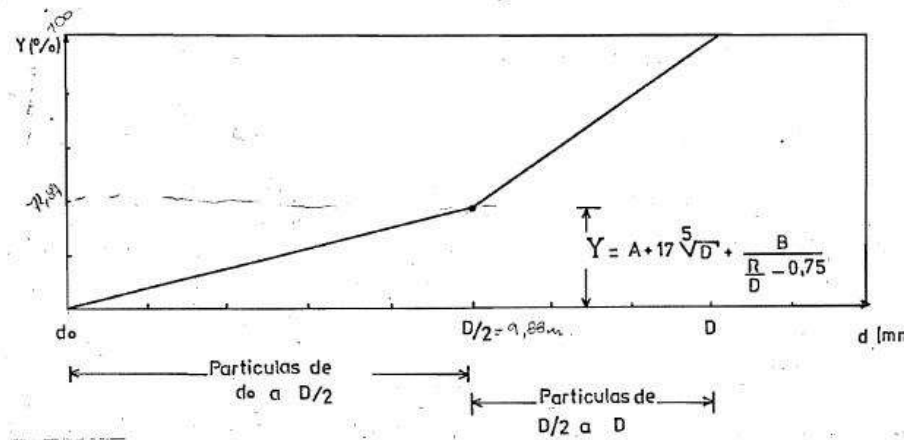
Paso 8. Dosificación por metro cúbico y proporción inicial. Igual al método Fuller – Thomson.

#### 2.7.4 MÉTODO FAURY

Método propuesto por Faury en 1942, donde plantea una nueva granulometría que dependa de la raíz quinta del tamaño del agregado  $((d)^{1/5})$  donde su principal uso se enfoca en concretos con un armado denso y estructuras prefabricadas.

En esta propuesta la curva granulométrica idónea se dirige a la capacidad máxima del agregado y en donde se diferencian dos tipo de

agregados; el primero de ellos que contienen a los agregados finos cuyos tamaños son menores a la mitad de los tamaños máximos de los demás (menor a  $D/2$ ), el segundo tipo lo conforman los agregados con dimensiones mayores a  $D/2$ . Esta curva se representa en la Figura 2-8.



**Figura 2-8. Representación gráfica de la ecuación de Faury.**  
Fuente: Giraldo Bolívar (1987).

Dónde:

$Y$  = Porcentaje en volumen absoluto de agregados que pasan las mallas de abertura  $d$  (incluyendo el cemento).

$d$  = Abertura de las mallas en mm (escala en proporción  $(d)^{1/5}$ )

$d_0$  = Tamaño mínimo de los agregados (0.0065 mm).

$D$  = Tamaño máximo de los agregados.

$A$  = Coeficiente dependiente de la forma de los agregados y la consistencia del concreto.

R = Radio medio del encofrado en la zona más densamente armada (mm).

El tamaño máximo del agregado representa la menor abertura del tamiz por la cual pasa todo el agregado, la cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$D = d1 + (d1 - d2) * (x / y)$$

Dado que

D = tamaño máximo del agregado (según ASTM D=2)

X = peso del agregado retenido en d1

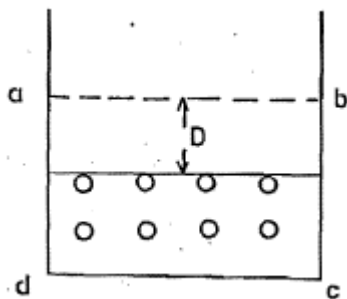
Y = peso de agregados retenidos en d2 y que pasan d1.

d2 = tamiz inmediatamente inferior

$$d2 = d1 / 2$$

d1 = la abertura del primer tamiz donde se retiene el agregado

El radio medio de encofrado es la relación del volumen del molde a su superficie, pero el volumen que se considera no es el de todo el molde sino el de la zona más densamente armada (Figura 2-9).



**Figura 2-9. Gráfica para calcular el radio del encofrado "R".**

*Fuente: Giraldo Bolívar (1987).*

El volumen será el prisma limitado por un plano ab a una distancia D (Tamaño máximo del agregado) de las barras superiores del acero de refuerzo.



Al volumen así considerado hay que restarle el volumen de las barras, con lo que se tendrá el volumen del molde V. La superficie del molde, en contacto con el concreto es la suma de las caras bc, ed y da más la superficie de las barras. El radio medio del encofrado se calcula:

$$R = (V/ S) = (((ab) * (bc) * (Largo)) - (V \text{ barras})) / ((ad) + (dc) + (cb) + S \text{ barras})$$

### *Procedimiento*

Paso 1. Determinación del tamaño máximo del agregado

Paso 2. Calculo del radio medio del encofrado R.

Paso 3. Calculo de la ordenada Y. Se calcula con respecto a la curva de referencia en D/2, por la ecuación:

$Y = A + (15 * ((D)^{1/5})) + (B / ((R/D) - 0.75))$  donde A y B se eligen de la Tabla 2-12 y 2-13 respectivamente.

**Tabla 2-12. Valores de B.**

<b>Compactación del concreto</b>	<b>Valor de B</b>
Vibración normal	1.5
Vibración potente	1.0

*Fuente: Adaptado de Giraldo Bolívar (1987).*

**Tabla 2-13. Valores de A.**

<b>Condiciones en la colocación del concreto en obra</b>	<b>Asentamiento cm</b>	<b>Valores de A para varios Tipos de agregados</b>		
		<b>Aluvial</b>	<b>Mixtos</b>	<b>Triturado</b>
Consistencia muy fluida, se colocará sin compactar	>15	>= 32	>= 34	>= 38
Consistencia fluida, se	10 – 15	30 – 32	32 – 34	36 - 38

colocará con baja compactación				
Consistencia blanda, compactación media.	5 – 10	28 – 30	30 - 32	34 - 36
Consistencia seca, alta compactación	2 – 5	26 – 28	28 - 30	32 – 34
Consistencia muy seca, compactación potente.	0.5 – 2	24 – 26	26 - 28	30 – 32
Consistencia de la tierra húmeda, compactación muy potente	0	22 – 24	24 - 26	28 – 30
Compactación excepcionalmente potente	-	<= 22	<= 24	<= 28

Fuente: Adaptado de Giraldo Bolívar (1987).

Paso 4. Determinación del volumen de huecos. El volumen de los huecos (VH) depende de la consistencia de la mezcla, naturaleza de los agregados, potencia de compactación y del tamaño máximo del agregado, se calcula mediante la fórmula:

$$VH = (K / (D) ^{1/5})$$

Mientras que la formula en un molde es:

$$VH = (K / (D) ^{1/5}) + ((K') / (R/D - 0.75))$$

Dónde:

D = Tamaño máximo del agregado mm

K = Coeficiente que depende de la consistencia del concreto, de la potencia de compactación y de la naturaleza de los agregados Tabla 2-14.

Tabla 2-14. Valores de K.

Condiciones en la colocación del concreto en obra				Valores de K para diferentes agregados*		
				Redondeados	Mixtos	Triturados
Consistencia	muy fluida	sin		>= 0.370	>= 0.405	>= 0.450

compactación				
Consistencia blanda, compactación media.	0.350 – 0.370	0.375 – 0.405	0.430 – 0.460	
Consistencia seca, alta compactación.	0.330 – 0.350	0.355 – 0.385	0.400 – 0.430	
Consistencia de tierra húmeda, compactación muy potente.	0.250 – 0.330	0.330 – 0.350	0.350 – 0.370	
Consistencia compactación extra-seca, excepcionalmente potente.	$\leq 0.250$	$\leq 0.330$	$\leq 0.350$	

\*Para agregados de forma y granulometría aceptable se recomienda usar el mínimo del rango

*Fuente: Adaptado de Giraldo Bolívar (1987).*

$K'$  = Coeficiente que depende de la potencia de compactación y es igual a 0.003 para compactación normal y vale 0.002 para alta compactación.

Paso 5. Cálculo del contenido de agua. Se multiplica el volumen de huecos por 1000 para obtener el peso del agua por metro cúbico de concreto. Si el cálculo se hace incluyendo aire se le resta el volumen del aire para obtener la cantidad de agua  $A$ .

$$\text{Peso de agua} = A = 1000 * (VH - Va)$$

Cuando el Volumen de aire ( $Va$ ) es cero  $A = 1000 * VH$

Paso 6. Resistencia de diseño de la mezcla. Igual al método A.C.I.

Paso 7. Relación Agua / Cemento en peso. Igual al método A.C.I.

Paso 8. Cantidad de cemento. Para conocer el porcentaje en volumen absoluto de sólidos en el concreto, se utiliza la expresión:

$$c = C/Pc * (1 / (1 - VH))$$

Dónde:



la abertura de tamiz que corresponden a la medida de las abscisas extremas de la frontera de los agregados, trazando la línea gh se leen %P3.

Paso 10. Dosificación del concreto. Se continua con los pesos de cada componente del concreto, multiplicando el porcentaje por 1000 (1 - VH) por peso específico aparente saturado.

Paso 11. Corrección por humedad, asentamiento y resistencia. Igual al método A.C.I.

### 3. METODOLOGÍA, MATERIALES Y EQUIPO

#### 3.1 DIAGRAMA DE METODOLOGÍA

El proceso a seguir para el diseño del concreto a usar para el pavimento se muestra a continuación en la Figura 3-1, así mismo se hace una breve descripción de los pasos.

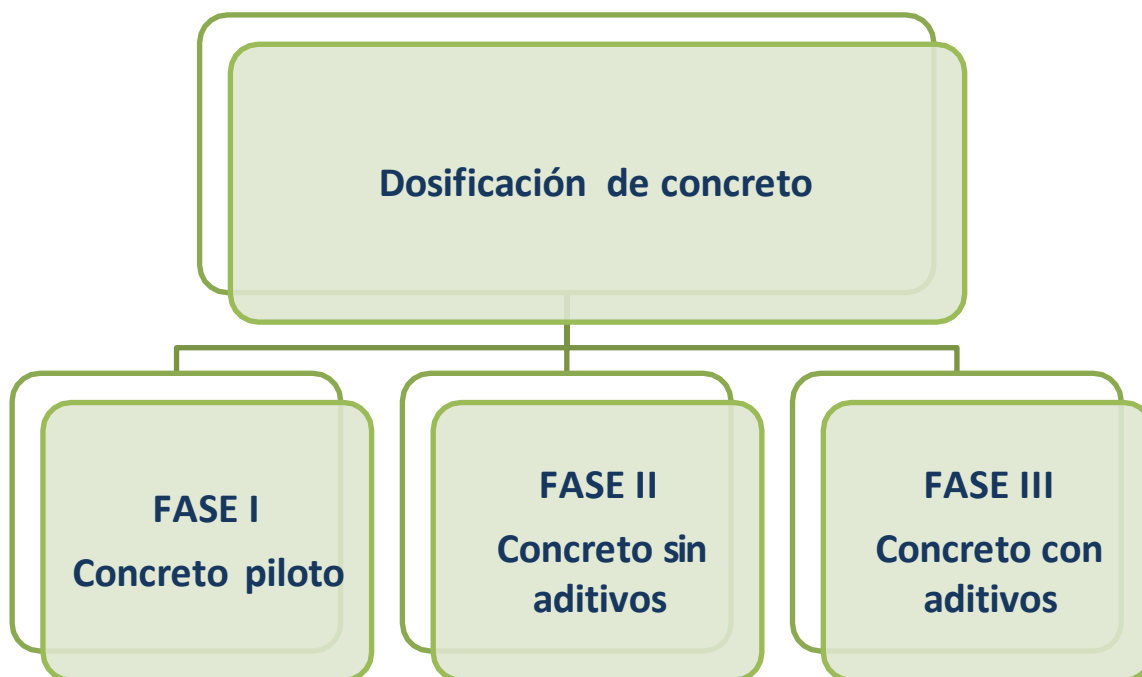


**Figura 3-1. Diagrama de flujo “Proceso de la Metodología empleada”.**

*Fuente: Elaboración propia.*

Cabe señalar que la investigación se divide en tres fases con el fin de llevar un control de los resultados. La primera fase consiste en el uso de materiales locales que son considerados desecho (agregado grueso y fino) pero cumpliendo con la normativa anteriormente descrita, esta fase tiene como fin observar el comportamiento del SBR en condiciones adversas tratando de disminuir al máximo la huella ecológica. En la segunda fase se realiza con materiales provenientes de bancos de trituración y arenas bien graduadas incorporando SBR en distintas proporciones pero sin el uso de aditivos con el objetivo de seleccionar los porcentajes con mayor y menor resistencia. La

tercera fase se realiza el concreto con los porcentajes seleccionados en la Fase 2 utilizando aditivos de alta resistencia Figura 3-2.



**Figura 3-2. Fases de la investigación**  
Fuente: Elaboración propia

En este sentido, se ha elaborado una matriz de mezclas para programar la cantidad de vigas y cilindros en función de las mezclas y los tiempos disponibles para su fraguado Tabla 3-1.

**Tabla 3-1. Matriz de mezclas por FASE.**

Edad (Días)	FASE I Concreto piloto		FASE II Concreto sin aditivos				FASE III Concreto con aditivos		
	Sin SBR	7% SBR	Sin SBR	5%	15%	25%	Sin SBR	5%	25%
7	---	---	3 cil.	3 cil.	3 cil.	3 cil.	3 cil.	3 cil.	3 cil.
14	---	---	3 cil.	3 cil.	3 cil.	3 cil.	3 cil.	3 cil.	3 cil.
21	---	---	3 cil.	3 cil.	3 cil.	3 cil.	3 cil.	3 cil.	3 cil.
28	2 cil.	2 cil.	3 cil.	3 cil.	3 cil.	3 cil.	3 cil.	3 cil.	3 cil.

2 vig. 2 vig. 2 vig. 2 vig. 2 vig. 2 vig. 2 vig. 2 vig. 2 vig.

*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.2 REVISIÓN DE NORMATIVA PARA CONCRETO

La revisión a la normativa a utilizar es por el hecho que la Fase I de la investigación se realizará en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Medellín, puesto que es posible que no cuenten con un equipo semejante al que se maneja en la Universidad Autónoma de Querétaro y que podrían variar los resultados de la caracterización de los materiales y las pruebas ejecutadas en dos laboratorios distintos.

Ahora bien, en caso de que esto ocurra, se colocarán la normativa y procedimientos de laboratorios que varían en cada una de las FASES y los resultados obtenidos. Si por el contrario, no se presentaron modificaciones en la ejecución de pruebas en este apartado solo se señalará de esta manera.

### 3.3 RECOLECCIÓN DE MATERIAL

Investigación sobre la adquisición del copolímero SBR en forma de fragmentos de llantas así como líquida, de igual manera el cemento hidráulico. Se pretende conseguir varias opciones de suministro, para caracterizar, evaluar y elegir los mejores materiales, finalmente hacer un listado de las mejores opciones en caso de presentarse cualquier percance que imposibilite conseguir material de alguna de ellas. A continuación se muestra una lista para la recolección de materiales.

#### 3.3.1 AGREGADOS FINOS Y GRUESOS

Con base al documento emitido por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes donde se muestra el inventario de los bancos de materiales que se encuentran en el estado, se seleccionaron aquellos cuyo uso probable es



considerado para concreto hidráulico y se encuentren más cercanos a las instalaciones de la Universidad son:

- LA MACHORRA. Carretera México- Querétaro Km 203+000.
- LA PALIZADA. Carretera Querétaro-Tequisquiapan Km 010+000.
- LA TRINIDAD. Carretera Querétaro-Tequisquiapan Km 010+200.
- LA COLMENA. Carretera Querétaro-San Luis Potosí Km 023+000.
- EL HUERTO. Carretera Querétaro-Irapuato Km 006+600.

### 3.3.2 CAUCHO ESTIRENO BUTADIENO(SBR).

La recolección de SBR se hará consiguiendo llantas de neumáticos y procesándolas hasta obtener el tamaño apropiado para su uso. Bajo esta premisa los mejores sitios de recolección de llantas usadas de acuerdo con su cercanía a la institución donde se realiza la investigación son:

- AUTOMOTRIZ DOCA.
- EUROTECH MOTORS.
- JORGE ROJAS AUTOMOTRIZ.
- UNITEC.CLUTH Y FRENOS SOTELO.

### 3.3.3 CEMENTO HIDRÁULICO.

La única restricción que se tiene para el cemento es que sea tipo portland por lo que es posible conseguirlo en cualquier distribuidor de cemento. Se muestran las opciones más cercanas a la institución:

- MATERIALES Y PREFABRICADOS AVARSA.
- GRUPO MASMATERIALES.
- FERRETERÍA Y ACEROS DE QUERÉTARO S.A DE C.V.
- COMERCIAL FERRETERA GALMA.

### 3.3.4 ADITIVOS.

El uso de este elemento está sujeto a los resultados obtenidos de investigaciones en proceso, por lo que su recolección se realizará dentro de las instalaciones donde se realizará la investigación. Los aditivos en cuestión se tratan de origen comercial, denominados SIKA acelerante y SIKA fluidificante, los porcentajes de uso se tomarán de investigaciones pasadas donde estas cantidades ayudaron a su manejabilidad.

### 3.4 SEPARACIÓN Y CONTROL DE MATERIALES.

Ubicación de sitio para resguardo de material, evitando su contaminación con partículas suspendidas en el entorno; así mismo, almacenando los agregados finos y gruesos por separado.

Así mismo, verificar que el laboratorio donde se realizarán las pruebas cuente con el equipo necesario y la disponibilidad del mismo. En este caso el laboratorio primordial es el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Resistencia de Materiales que se encuentra en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, en el supuesto que algún equipo este inhabilitado o que no se disponga de él en las instalaciones, se buscaran laboratorios en los que se puedan efectuar las pruebas.

### 3.5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.

En realidad no se tomaría como caracterización, sino como una adecuación de los materiales para que cumplan con la normativa abajo mencionada. Se realiza cada uno de los elementos por separado, con el fin de obtener las características físicas y mecánicas que cumpla con la normativa expuesta, tal y como se indica a continuación:

#### 3.5.1 AGREGADOS FINOS Y GRUESOS

Las normas que se aplicarán para la caracterización de los agregados son:

- Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos. Norma inv no 213
- Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso y finos. Norma inv no 222 – 223
- Equivalente de arena. Norma m-mmp-4-04-004
- Desgaste los ángeles. Norma nmx - c- 196 - ONNCCE - 2008
- Limite plástico. Norma ASTM d 4318 -00
- Limite líquido. Norma bs 1377

### 3.5.2 CAUCHO ESTIRENO-BUTADIENO (SBR).

Para utilizar el SBR en un concreto hidráulico se debe de pasar por tres fases dependiendo del tamaño de partículas que se requieren. En la primera se toma el hule de neumáticos y se tritura a centímetros mediante trituradores de residuos sólidos, posteriormente se realiza la molienda a temperatura ambiente que reduce el tamaño a 0.32 mm aproximadamente. El último proceso es llamado criogenización o molienda en húmedo en el que baja la temperatura hasta conseguir su fragilización (inmersión directa en nitrógeno líquido) en el que se consiguen tamaños de 0.16mm.

### 3.5.3 ADITIVOS DE ALTA RESISTENCIA

La función principal es facilitar la aplicación del SBR en la mezcla de concreto, proporcionando mejor adhesividad y reacción mecánica a la mezcla. Dependiendo del tipo de aditivo del que se trate, las pruebas a realizar se muestran en la Tabla 3-2. Para este estudio se trabajara con un agente fluidificante de la marca Sika cem, el cual entra en la primera clasificación y que de acuerdo a las indicaciones propias del fabricante se puede utilizar.

**Tabla 3-2. Normativa de aditivos con base a su funcionalidad.**

<b>Funcionalidad del aditivo</b>	<b>Normativa</b>
Reductores de agua, retardantes o acelerantes.	ASTM C 494 o ASTM C 1017.
Cenizas volantes u otras puzolanas.	ASTM C 618
Escoria molida granulada de alto horno.	ASTM C 989.
Con concreto expansivo.	ASTM C 845.
Humo de sílice.	ASTM C 1240.

*Fuente: ACI 318-05*

### 3.6 DISEÑO DE DOSIFICACIONES

En el ACI 211 se detalla dos métodos para proporcionar mezclas de concreto de peso normal y denso, el primero basado en un peso estimado de concreto por volumen unitario, el segundo basado en el cálculo del volumen absoluto que ocupan los componentes del concreto. Estos métodos son aproximaciones que después deben de ser verificadas con pruebas en laboratorio o campo y de ser necesario modificar las proporciones. A continuación se muestra los pasos para determinar los porcentajes de la mezcla:

- Elección del revenimiento.
- Elección del tamaño máximo de agregado.
- Cálculo del agua de mezclado y el contenido de aire.
- Selección de la relación agua-cemento.
- Cálculo del contenido de cemento.
- Estimación del contenido de agregado grueso.
- Estimación del contenido de agregado fino.
- Ajuste por humedad del agregado.
- Ajustes en las mezclas de prueba.

La fabricación de mezcla patrón se realizará una mezcla patrón donde no se tendrá SBR ni aditivo y se caracterizará física y mecánicamente, el propósito de esta mezcla preliminar es tener un punto de comparación.

### 3.6.1 FABRICACIÓN DE LAS MEZCLAS DE LA MATRIZ.

En la Fase I se usaron diferentes tamaños de partículas, desde SBR de 0.32 mm +- 2cm hasta el uso en forma de polvo, tomando un 7% de SBR del porcentaje del agregado fino con el fin de tener un panorama general del comportamiento del SBR, realizando los ensayos a compresión y flexión en moldes cilíndricos de 15x30cm y rectangulares de 60x15x15cm, respectivamente, ambos a la edad de 28 días. En cuanto a la Fase II y Fase III se utilizaron partículas menores de 4.76 mm (límite entre un agregado fino y uno grueso) y usando moldes cilíndricos de 10x20cm a las edades de 7, 14, 21y 28 días para compresión y moldes rectangulares de 50x15x15cm a la edad de 28 días a flexión diferenciándose estas fases por el uso de aditivos de alta resistencia y conteniendo mezclas con 5%, 15% y 25% para la Fase I mientras que en la Fase II se manejaron porcentajes de 5% y 25%, tal y como se muestra en la Tabla 3-3.

**Tabla 3-3. Matriz de mezclas**

<b>Edad (días)</b>	<b>Fase I (Materiales típicos de Antioquia)</b>		<b>Fase II (Materiales típicos de Querétaro)</b>				<b>Fase III (Materiales típicos de Querétaro)</b>			
7										
14	Base	7%	Base	5%	15%	25%	Base	5%	25%	
21		SBR		SBR	SBR	SBR		SBR +	SBR +	
28								Aditivo	Aditivo	

*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.6.2 PRUEBAS EN LABORATORIO PARA ESPECÍMENES DE MEZCLAS DE CONCRETO.

La reacción de la muestra a los 3 días es para verificar si existe la aceleración en el curado del concreto cuando se agrega agentes rejuvenecedores. Por otra parte, aquellas cuyo curado son de 7 y 14 días son resultados referenciales para ayudar a proyectar la resistencia al paso del tiempo, la de 28 días es la utilizada para los valores de módulo de resiliencia, para finalizar las muestras con curado de 90 días son las que se utilizan para el diseño de vialidades de altas especificaciones, aquellas que deben resistir el paso de mayores ejes equivalentes (autopistas), incrementándose la resistencia hasta un 10% el valor de la de 28 días, esta descripción se muestra en la Tabla 3-4.

**Tabla 3-4. Objetivos de los especímenes de acuerdo al tiempo de curado del concreto**

<b>Edad</b>	<b>Objetivos de los especímenes.</b>
7 días	Comprobar si existe aceleración por la utilización de los agentes en comparación con una mezcla convencional.
14 días	Proyectar la resistencia a flexión y compresión en el transcurrir del tiempo.
21 días	
28 días	Diseño de espesores para carreteras.

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.7 PRUEBAS A ESPECÍMENES

#### 3.7.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN AXIAL. MÓDULO DE ELASTICIDAD.

La ASTM C-469 nos muestra que es un parámetro que indica la rigidez y la capacidad de distribuir cargas que tiene una losa de pavimento. Es la relación entre la tensión y la deformación. En los pavimentos de concreto armado continuo, el módulo de elasticidad junto con el coeficiente de expansión térmica y el de contracción del concreto, son los que rigen el estado de tensiones en la armadura.

### 3.7.2 *RESISTENCIA A LA TENSION POR FLEXIÓN. MÓDULO DERUPTURA*

De acuerdo a la norma ASTM- C78, con esta prueba se busca controlar el agrietamiento por fatiga del pavimento, originado por las cargas de camiones. Este módulo es el obtenido a los 28 días utilizando el ensayo de carga en los tercios, así el momento flector y la rotura se producirá en cualquier punto del tercio medio siempre y cuando exista debilidad en el espécimen.

## **4. RESULTADOS, ANÁLISIS y DISCUSIÓN.**

### 4.1 COMPARATIVA Y ELECCIÓN DE NORMATIVA VIGENTE

Durante las pruebas realizadas en la Universidad de Medellín se percató que la normativa que se aplican a las vías terrestres en Colombia están regidas por Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Al revisar esta normativas se llegó a la conclusión que este organismo rector en lo que respecta a las vías terrestres maneja una normativa que al igual que la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) en México, se basa en la propuesta de la ASTM y que por lo tanto las variables entre estos organismos residen en las condiciones que consideran aceptables cada uno y no en la ejecución de las pruebas de laboratorio-

### 4.2 MATERIAL RECOLECTADO.

En primera instancia se seleccionaron los bancos de materiales más cercanos a la institución donde se realiza la investigación, buscándolos en el documento emitido por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (2016), la Figura 4-1 muestran la ubicación de ellos.



**Figura 4-1. Localización de banco de materiales sobre autopista Querétaro-Tequisquiapan.**  
*Fuente: Inventario de Banco de materiales 2016.*

Posteriormente se filtraron los bancos por el posible uso de los materiales que se extrae, reduciendo los posibles bancos (Tabla 4-1).

**Tabla 4-1. Banco de materiales cercanos a la Universidad Autónoma de Querétaro**

ID	Banco	Material	Uso probable
6	La Machorra	Basalto	2-5-6-10
10	Conin	Basalto	2-3-4-5-6-10
13	El Fresno	Conglomerado	1
14	Tlachco	Basalto	2-5-6-10
16	La Palizada	Basalto-Arena	4-5-6-10
17	Buenavistilla	Conglomerado	10
18	La Trinidad	Basalto	2-4-5-6-10
19	La Cañada	Basalto	5-6-8
40	La Negreta	Volcánico	5-6-7
42	El Huerto	Basalto	2-5-6-7-10

*Fuente: Elaboración propia.*

Donde la denominación de los usos probables son:

1.- Revestimiento



- 2.- Sub-base
- 3.- Sub-balasto
- 4.- Balasto
- 5.- Base
- 6.- Concreto asfáltico
- 7.- Mezcla asfáltica en el lugar
- 8.- Sello
- 9.- Mampostería
- 10.- Concreto hidráulico
- 11.- Escolleras

Así, para el diseño de concreto hidráulico es factible utilizar los bancos cuyos usos probables son Concreto hidráulico, mampostería o concreto asfáltico, eligiéndose el banco denominado “La Cañada”.

#### 4.3 SEPARACIÓN Y CONTROL DE MATERIALES.

La separación del material se realiza para tener un control del material utilizado y para estar preparados, sin embargo la razón principal de la elección del sitio es para proteger el material de los cambios climáticos y mantener alejado el material del personal que trabaja en el laboratorio. En la Figura 4-2 se muestran los sitios donde se resguardan los dos agregados y el SBR. En la imagen de la izquierda se encuentra el material utilizado en la FASE I mientras que en la imagen de la derecha se encuentra el material de la FASE II y III.



**Figura 4-2. Separación y control de material.**

#### 4.4 PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.

##### Grava

Se inició la caracterización de material grueso con un volumen de 8950 gr después del cuarteo del material obtenido del banco de material “La Cañada”. El volumen de material retenido en cada malla de acuerdo a la norma se muestra en la Tabla 4-2.

**Tabla 4-2. Granulometría agregado grueso.**

<b>Malla</b>	<b>Abertura norma (mm)</b>	<b>Retenido seco(g)</b>	<b>Ret. (%)</b>	<b>Ret. Acum. (%)</b>	<b>Pasa (%)</b>
2"	50	0	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.5	225.42	2.52	2.52	97.48
1"	25	1946.97	21.81	24.33	75.67
3/4"	19	1246.88	13.97	38.30	61.70
1/2"	12.5	1773.89	19.87	58.16	41.84
3/8"	9.5	729.41	8.17	66.33	33.67
1/4"	6.3	1157.55	12.96	79.30	20.70
#4	4.75	539.91	6.05	85.34	14.66
Pasa No.4		1308.55	14.66	100.00	
# 10	2	213.56	11.42	11.42	3.23
# 20	0.8	39.3	2.10	13.53	1.13
# 40	0.42	8.87	0.47	14.00	0.66
# 60	0.25	7.22	0.39	14.39	0.27
# 100	0.149	2.27	0.12	14.51	0.15
# 10	2	213.56	11.42	11.42	3.23
# 20	0.8	39.3	2.10	13.53	1.13
# 40	0.42	8.87	0.47	14.00	0.66
# 60	0.25	7.22	0.39	14.39	0.27
# 100	0.149	2.27	0.12	14.51	0.15
# 200	0.074	1.86	0.10	14.61	0.05
Pasa No. 200		0.91	0.05	14.66	0.00
Total			9202.57		

Fuente: Elaboración propia

Los resultados que arrojó las pruebas de separación por malla no. 4, testigo de humedad y corrección por humedad se muestran a continuación (Tabla 4-3, 4-4, y 4-5 respectivamente):

**Tabla 4-3. Separación por la malla No.4**

<b>Datos</b>	<b>Resultado</b>
Masa total de la muestra (Wm):	8948
De la fracción retenida en la malla No.4 (Wm1=Wd1), (gr).	7640
De la fracción que pasa la malla No.4 (Wm2), (gr).	1308.55
Peso Total Wm, (gr).	8948
Peso Retenido en la malla No. 4 (Wm1=Wd1), (gr).	539.91
Peso del Material que pasa la malla No.4 (Wm2), (gr)	8928.58

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4-4. Testigo de humedad de la fracción que pasó la malla No.4.**

<b>Datos</b>	<b>Resultado</b>
Flanera No:	XXX
Peso de la Flanera (gr), Wf:	126.75
Wmh+Wf (gr):	229.17
Wms + Wf (gr):	228.07
W(%)	1.086

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4-5. Corrección por humedad de la fracción que pasa la malla No.4.**

<b>Datos</b>	<b>Resultado</b>
Masa del material seco de la fracción que pasó la malla No. 4	1294.5
Peso total Coregido (gr), Wd1+Wd2:	8934.5
Masa del material seco que pasó la malla No. 4	271.05

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-3 se observan el tamaño de los agregados, a la izquierda el SBR con cuto tamaño máximo es la malla No. 4 en el centro se encuentra la grava en la que el tamaño máximo nominal es d 2 1/2" y a la derecha se encuentra la arena (pasa No.4).



**Figura 4-3. Tamaño de los agregados.**  
Fuente: Elaboración propia

La relación entre la abertura de la malla y los porcentajes de material que pasan se aprecian en la Tabla 4-6, así mismo, la curva granulométrica que forman se observa en la Figura 4-4.

**Tabla 4-6. Relación Abertura de malla – Porcentaje que pasa del material proveniente del banco “La Cañada”.**

Malla	Abertura(mm)	Abertura norma (mm)	Pasa (%)
<b>Grava</b>			
2"	50.7	50	100.00
1 1/2"	39.94	37.5	97.48
1"	25.32	25	75.67
3/4"	19.32	19	61.70
1/2"	12.54	12.5	41.84
3/8"	10	9.5	33.67
1/4"	6.42	6.3	20.70
#4	4.68	4.75	14.66
<b>Arena</b>			
#10	2	2	3.23
#20	0.85	0.85	1.13
#40	0.425	0.425	0.66
#60	0.25	0.25	0.27
#100	0.15	0.15	0.15

#200  
pasa  
#200

0.075

0.075

0.05

Fuente: Elaboración propia

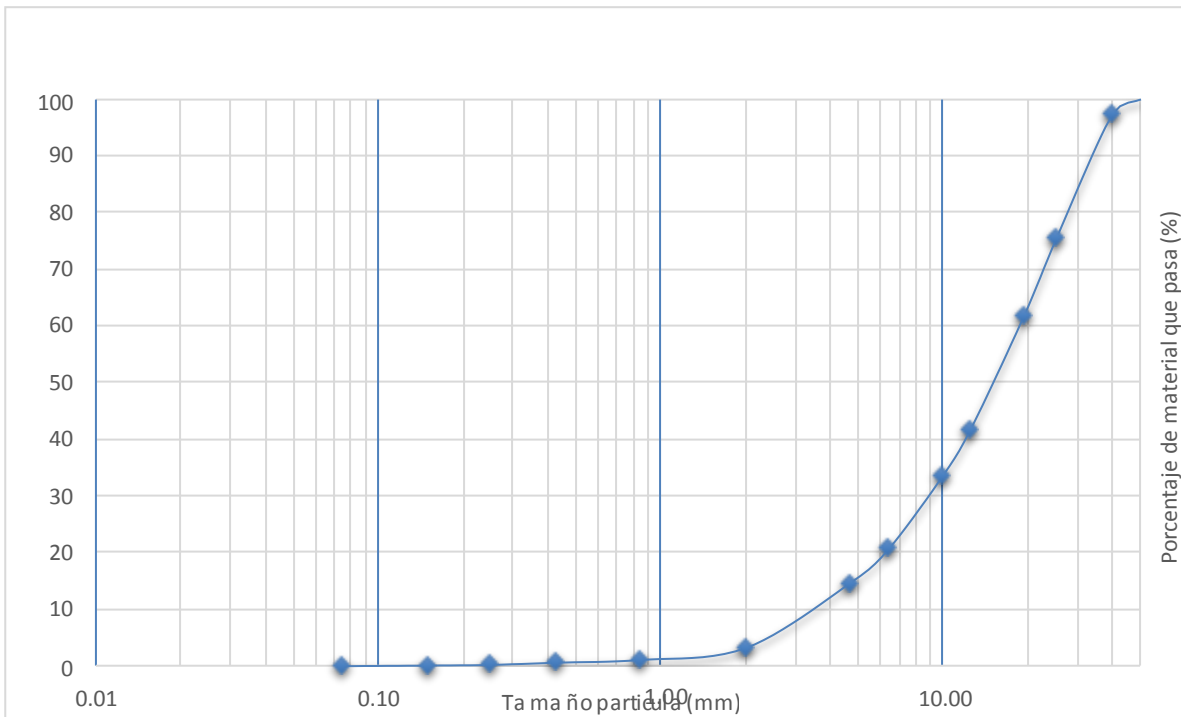


Figura 4-4. Curva granulométrica del banco "La Cañada"

Fuente: Elaboración propia

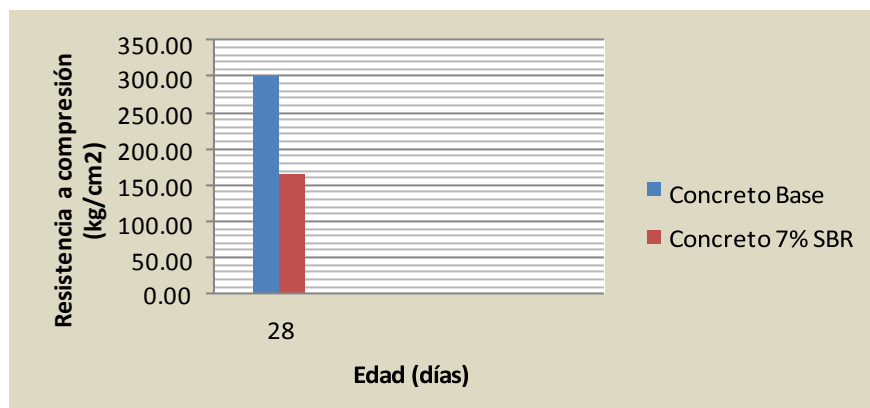
<b>D60=</b>	0.372	18.1
<b>D30=</b>	0.364	8.9
<b>D10=</b>	0.359	2.5
<b>Cu=</b>	1.03410781	7.24
<b>Cc=</b>	0.99331464	1.75049724

#### 4.5 DOSIFICACIONES DE ESPECÍMENES BASE Y MODIFICADA.

Después de analizar cada uno de los métodos para diseñar la mezcla de concreto se llegó a la conclusión que el método que mejor se adecua a las intenciones para las que se utilizará es el método propuesto por la ACI. Además de esto, las características que se necesitan saber para el cálculo de las dosificaciones en este método (resistencia del concreto, el peso específico del agua y de los agregados) se acoplan muy bien con las pruebas de caracterización que se han realizado en las FASES I, II y III.

#### 4.6 PRUEBAS A FLEXION Y COMPRESIÓN DE CONCRETO PILOTO (FASE I)

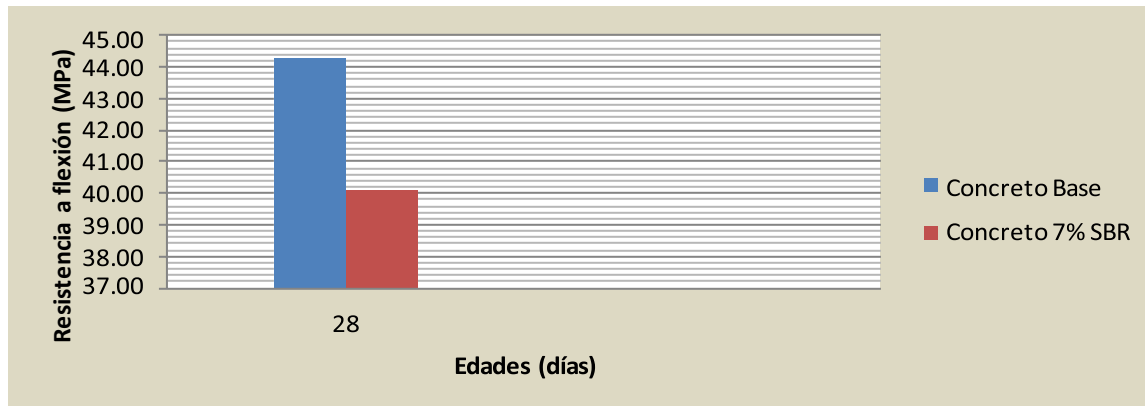
Se presentan los resultados obtenidos de las pruebas a compresión en la Figura 4-5. Se puede observar que la resistencia obtenida a compresión alcanza los 300 kg/cm<sup>2</sup>. Mientras que en el caso del concreto con SBR se vio disminuido a 168.00 kg/cm<sup>2</sup>, sin embargo como se mencionó con anterioridad este valor la cantidad de pruebas para compresión fue de dos cilindros y dos vigas, lo cual no puede considerarse representativa de los resultados pero se puede concluir con base a estas pruebas que se disminuirá la resistencia del concreto al incorporar el SBR.



**Figura 4-5. Prueba a compresión del concreto piloto (Fase I)**

*Fuente: Elaboración propia*

La Figura 4-6 muestra los resultados a flexión del concreto de la FASE I, al igual que en los resultados a compresión se observa una disminución considerable pues pasa de una resistencia superior a los 44.00 MPa a una que alcanza apenas los 40 .00 MPa.



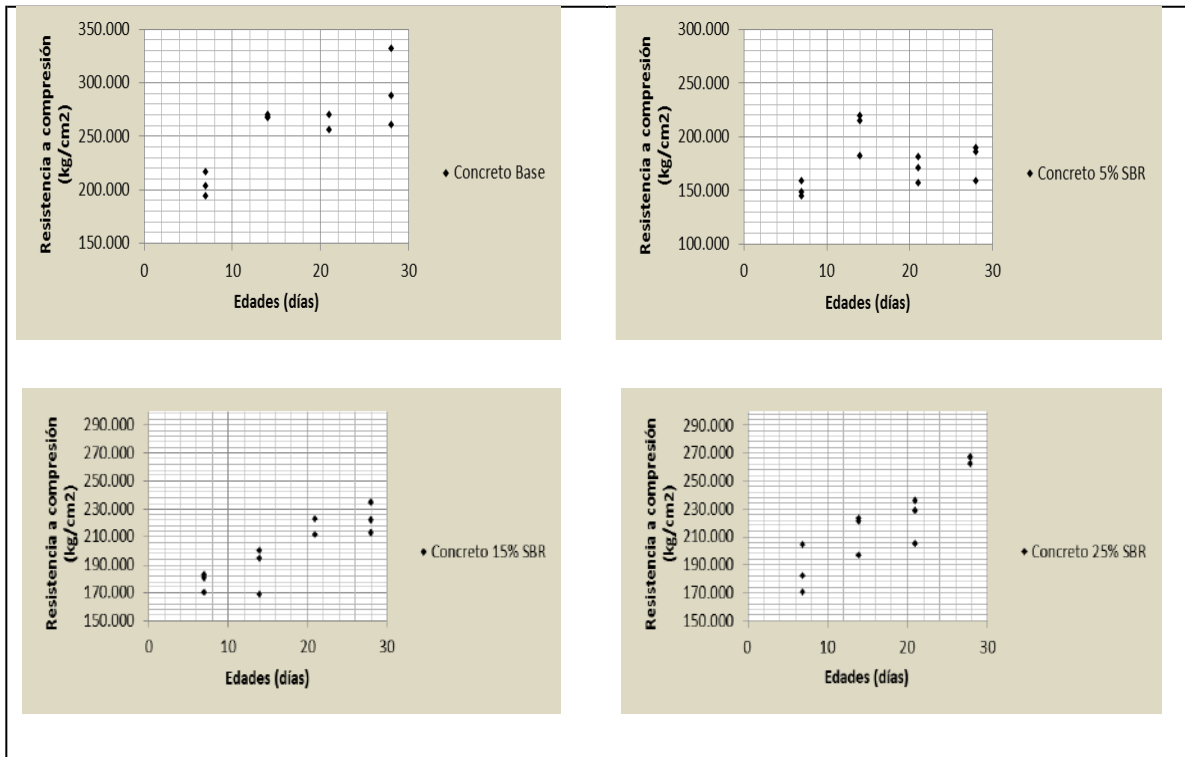
**Figura 4-6. Prueba a flexión del concreto piloto (Fase I)**

*Fuente: Elaboración propia*

A pesar de los resultados negativos obtenidos en la Fase I, se continúa con la investigación como se ha propuesto, ya que se aclarara si la disminución de la resistencia tanto a compresión como a flexión se dio por un error provocado por la cantidad de especímenes o al momento de ensayar las muestras. Sin embargo, a partir de estos resultados es posible que la disminución haya sido causada tal vez por una inadecuada unión de los agregados con el SBR, hipótesis que se despejaron al analizar los resultados de la Fase II.

#### 4.7 PRUEBAS A FLEXION Y COMPRESIÓN DE CONCRETO SIN ADITIVOS (FASE II)

De los resultados obtenidos durante esta Fase, primeramente es necesario conocer el comportamiento de cada una de las mezclas y el desarrollo de la resistencia de los especímenes durante los 28 días. La Figura 4-7 muestra las gráficas de las cuatro mezclas de esta Fase.



**Figura 4-7. Desarrollo de la prueba a compresión del concreto (Fase II)**

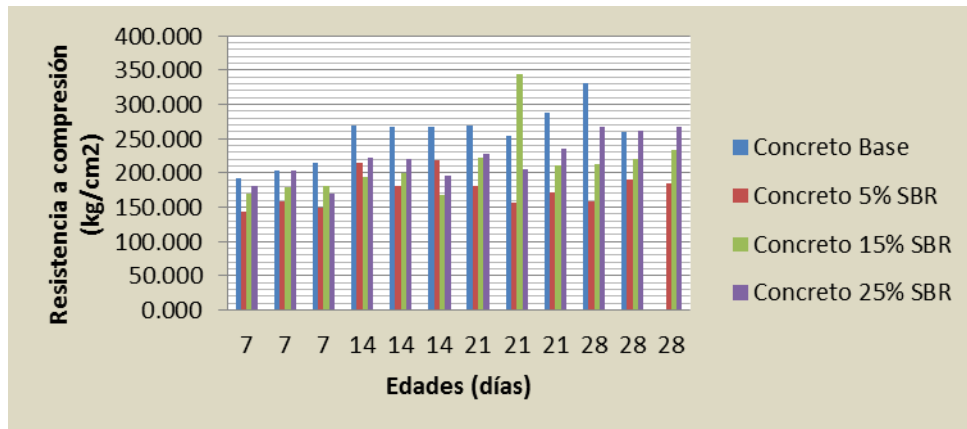
*Fuente: Elaboración propia*

Se puede apreciar que el mayor incremento que se dio del día 7 al día 28 se presentó en la mezcla base con una diferencia del 88.78 kg/cm<sup>2</sup> mientras que el menor aumento fue en la mezcla que contiene un 5% de SBR cuyo incremento solo fue de 27.60 kg/cm<sup>2</sup>.

Por otra parte, en la Figura 4-8 se muestran los resultados de la resistencia a compresión mediante los promedios de los tres especímenes por mezcla y agrupándolos por la edad a la que se ensayaron. Se puede notar que la mezcla base siempre se mantuvo con las resistencias más altas mientras que la mezcla con el 5% de SBR fue el que presentó menor resistencia en las tres edades. Cabe señalar que la mezcla con el 25% mantuvo su crecimiento constante en el tiempo de las pruebas.



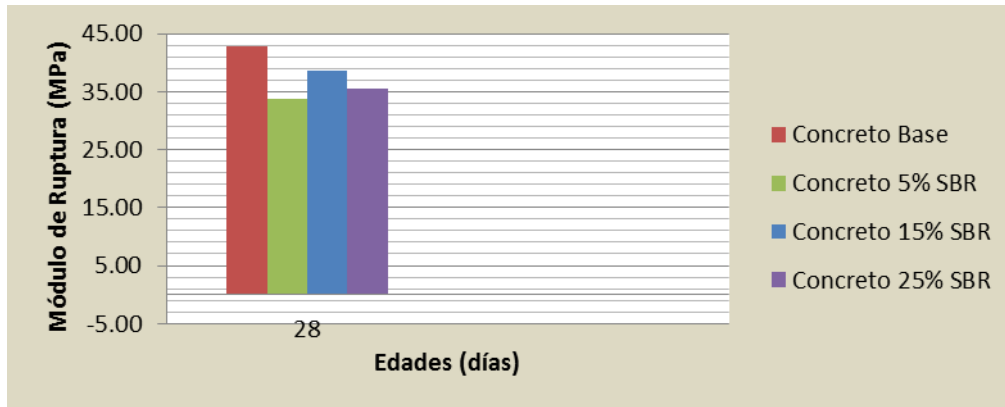
Con la información obtenida hasta esta Fase, se puede concluir que los porcentajes de SBR a utilizar para la Fase III serán las mezclas con 5% y 15% de SBR, puesto que los resultados que se obtuvieron de la primera genera la duda de cómo se comportará al incorporarle aditivos, seguirá disminuyendo la resistencia a compresión, se mantendrá o llegará a tener la misma resistencia que la mezcla base.



**Figura 4-8. Prueba a compresión del concreto sin aditivos (Fase II)**

*Fuente: Elaboración propia*

Por su parte, la Figura 4-9 permite revisar los resultados obtenidos de los especímenes para la resistencia a flexión, a la edad de 28 días. En ella se puede observar que al igual que el ensayo a compresión, la mezcla base se mantiene por encima de las demás y no teniendo gran diferencia entre esta con las que contenían SBR. Ahora bien, de las mezclas con SBR la que contenía 15% de caucho es la que se posiciona en segundo lugar, después la de 25% y al final la de 5%.

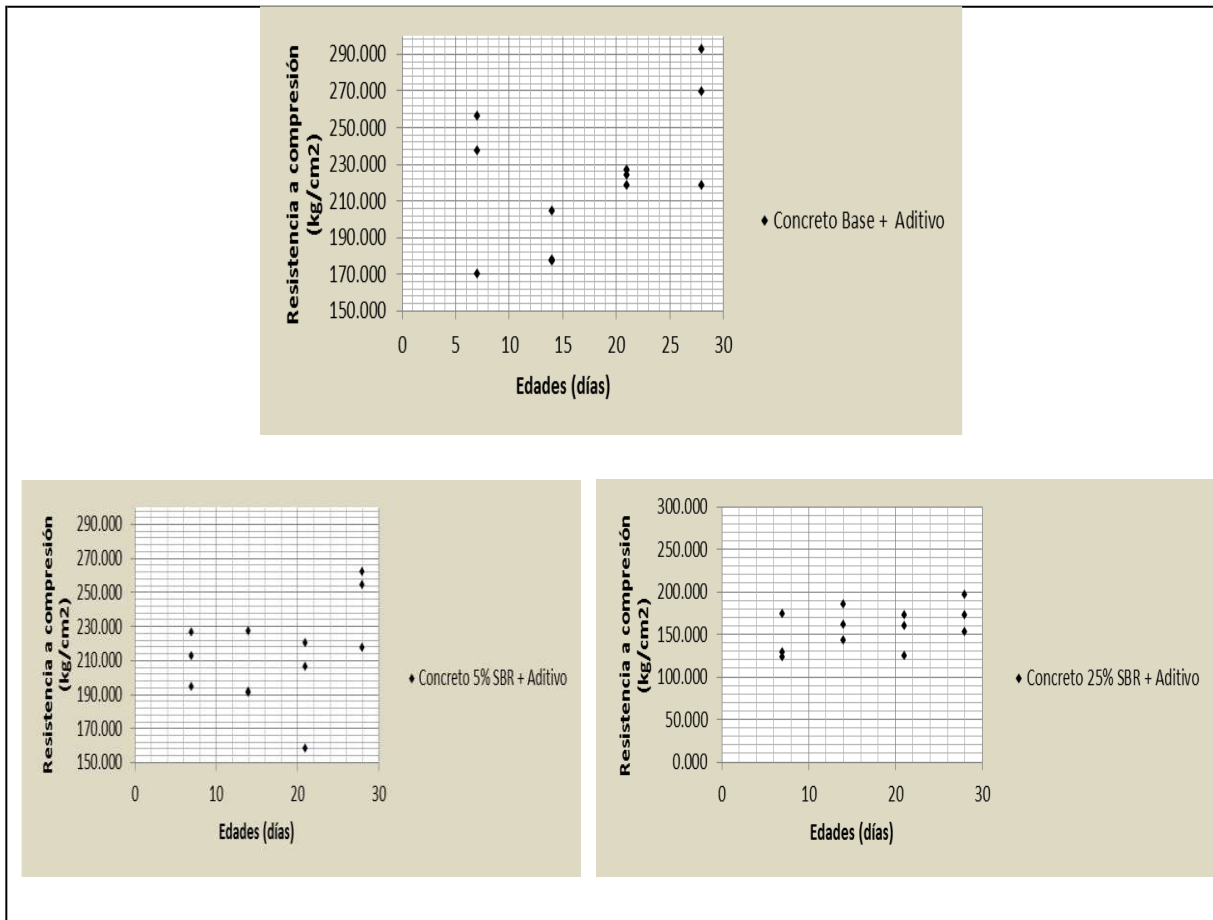


**Figura 4-9. Prueba a flexión del concreto sin aditivos (Fase II)**

*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.8 PRUEBAS A FLEXION Y COMPRESIÓN DE CONCRETO CON ADITIVOS (FASE III)

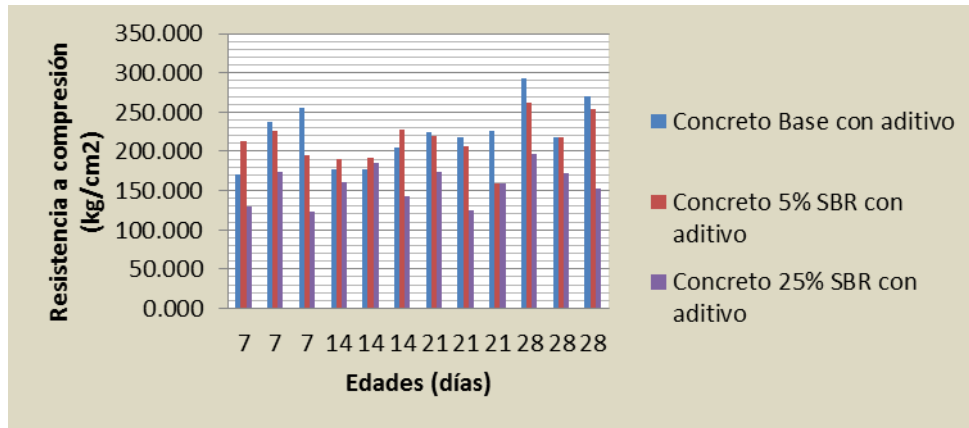
En este apartado se observan los resultados obtenidos de las pruebas a flexión y compresión de la Fase II, donde se eligieron los porcentajes de 5% y 25% para analizar el comportamiento del concreto con SBR más aditivo fluidificante y acelerante. En la Figura 4-10 se observa los resultados de la prueba a compresión de las tres mezclas. A diferencia con las mezclas de la Fase II, estos concretos muestran un aumento de la resistencia menos abrupto en las edades de ensaye, debido a la intervención del aditivo acelerante.



**Figura 4-10. Desarrollo de la prueba a compresión del concreto (Fase III)**

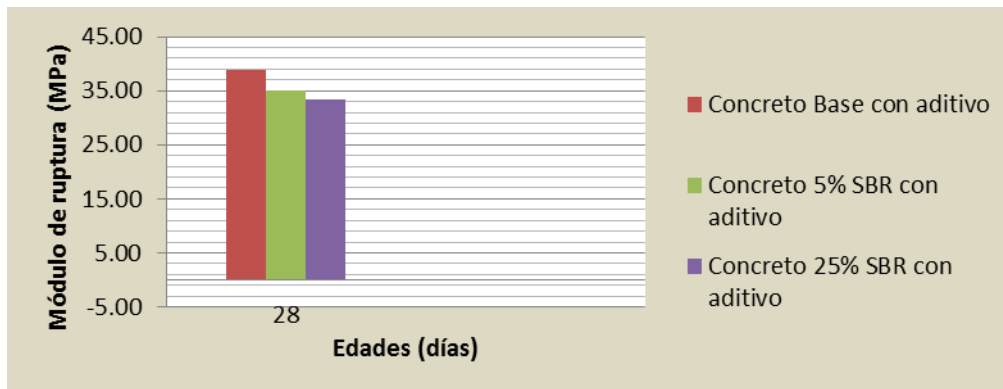
*Fuente: Elaboración propia*

Al igual que en la Fase II el concreto convencional se mantiene por encima de los demás (Figura 4-11). En ella se observa que el aumento de la resistencia a compresión se mantuvo continuo en las tres mezclas, sin embargo el concreto con 5% de SBR tuvo mayor resistencia que la de 25% provocando un aumento de resistencia en concreto con 5% SBR más aditivos.



**Figura 4-11. Prueba a compresión por edades del concreto con aditivos (Fase II)**  
*Fuente: Elaboración propia*

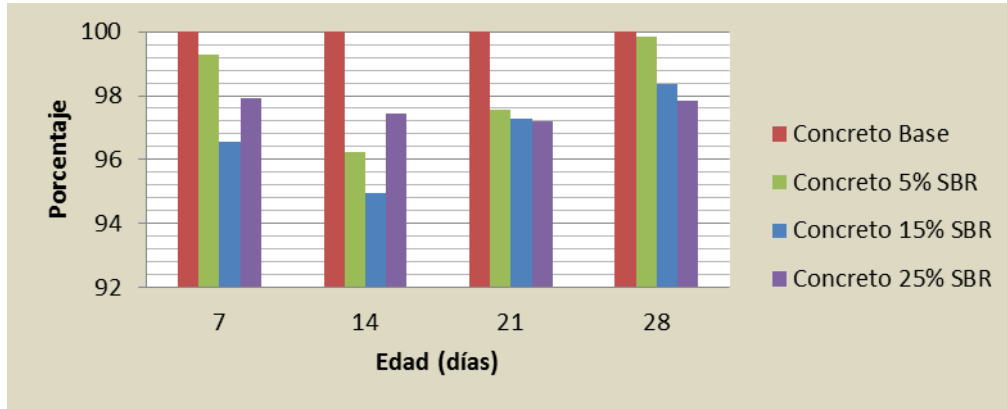
En cuanto a la prueba a flexión los resultados se observan en la Figura 4-12 en ella la mezcla convencional mantiene resistencia arriba que las de 5% y 25%. La diferencia entre la mezcla base y la de 5% es de 3.71 kg/cm<sup>2</sup> mientras que la diferencia con la de 25% es de 5.37 kg/cm<sup>2</sup>.



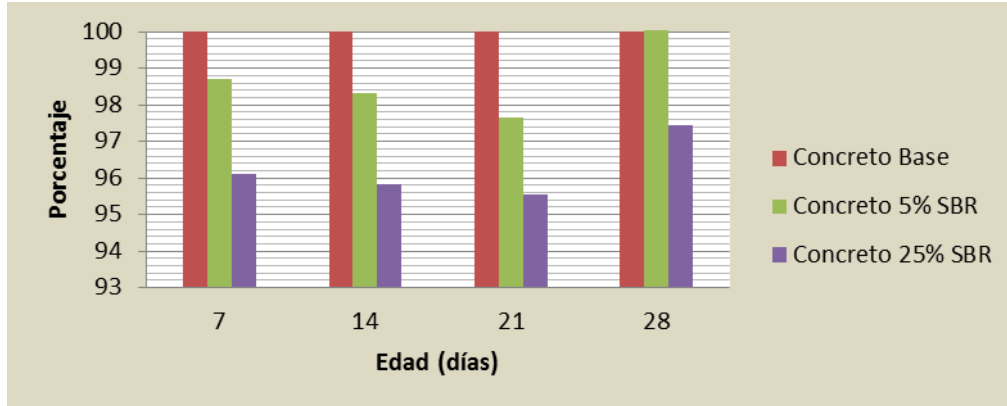
**Figura 4-12. Prueba a flexión del concreto con aditivos (Fase II)**  
*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.9 ALIGERAMIENTO DEL CONCRETO FASE II Y FASE III

El aligeramiento que se presentó al cambiar un porcentaje del agregado por SBR se muestran en la Figura 4-13 y 4-14, y como era de esperarse se presentó mayor aligeramiento a mayor porcentaje de SBR en ambas Fases.



**Figura 4-13. Porcentaje de aligeramiento del concreto sin aditivos (Fase II)**  
*Fuente: Elaboración propia*



**Figura 4-14. Porcentaje del aligeramiento del concreto con aditivos (Fase II )**  
*Fuente: Elaboración propia*

Ahora bien, los resultados de cada uno de los especímenes se pueden observar en los Anexos D y E, mientras que las fallas que presentaron de los cilindros en los ensayos se muestran en el Anexo F.

## 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA

### 5.1 CONCLUSIONES

Al término de la investigación en la que consistía incorporar SBR en partículas de menores de 4.76 mm se han obtenido las siguientes conclusiones:

En la FASE I el concreto con incorporación de SBR disminuyó en un 44.40% la resistencia a compresión y en 9.52% a flexión con respecto al concreto base.

En incremento de los especímenes que se ensayaron a compresión en la FASE II fue constante, a los 7 días se presentó el mayor incremento sin embargo en las edades restantes el incremento fue significativo. Por otra parte, los especímenes que constituyen a FASE III no tuvieron un aumento significativo pasados los ensayos a 7 días.

La resistencia a compresión máxima obtenida en la FASE II se presentó en el concreto con 25% de SBR alcanzando 265.414 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que aquellas mezclas que contenían un 5% y 15% alcanzaron 177.96 kg/cm<sup>2</sup> y 222.239 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente. En contraste, en la FASE III la mayor resistencia la obtuvo el concreto con 5% de SBR (244.432 kg/cm<sup>2</sup>), el concreto con 25% consiguió 174.026 kg/cm<sup>2</sup>.

En el concreto base y el que contenía 25% de SBR se obtuvieron mayores resistencias sin el uso de aditivo durante las 4 edades a las que se ensayaron los especímenes.

En cuanto a la densidad que se presentó del concreto no se obtuvieron variaciones significativas, por otro lado se aligeró hasta un 3% reemplazando el 25% del agregado fino.

La resistencia a flexión máxima se obtuvo en la FASE II en el concreto con 15% de SBR, cuya resistencia alcanzada fue de 35.41 MPa.

Las fallas que se presentaron en los especímenes ensayados a compresión fueron del tipo 3 y 5. El primer tipo de falla se dio ya que el agregado grueso no logró trabajar con los otros elementos, el segundo por el uso de almohadillas de neopreno durante el ensayo.

Se demostró que las resistencias, tanto a flexión como a compresión en cada una de las Fases analizadas se encuentran en un rango aceptable para el uso en pavimentos y, en consecuencia, contribuye con el reusó de llantas que han cumplido con su vida útil.

## 5.2 LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA

- Comparar propiedades físicas como la reducción a la contaminación acústica y porosidad aparente.
- Comparación de otros porcentajes de SBR.
- Aplicación de SBR con diferentes dimensiones.
- Aumento de resistencia mediante otros procedimientos

## REFERENCIAS

- American concrete Pavement Association,(2012). “*Análisis del costo del ciclo de vida. Una herramienta para evaluar mejor las inversiones y decisiones técnicas en pavimentación*”
- American Society for Testing and Materials, (2004). “Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete C 494/C 494M – 04”. *ASTM International*.
- American Society for Testing and Materials, (2003).” Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete C 1017/C 1017M – 03”. *ASTM International*.
- American Society for Testing and Materials, (2000). “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading) C 78 – 00”. *ASTM International*.
- American Society for Testing and Materials, (2002). “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression C 469 – 02”. *ASTM International*.
- Ahmed Shaban Abdel-Hay, (2015). “Properties of recycled concrete aggregate under different curing conditions”. *Housing and Building National Research Center*.  
Doi:
- Al Jumaily M.A. (2016). “Performance improvement of SBR polymer concrete used in construction of rigid pavement highway”. *World Academy of science, Engineering and Technology International Journal of Geotechnical and Geological Engineering*. 10:1.
- Ávila Córdoba, L.I., Martínez-Barrera, G., Barrera-Díaz, C.E., Ureña Núñez, F., & Loza Yáñez, A. (2015). PET de desecho y su uso en concreto. En Martínez Barrera, G., Hernández Zaragoza, J.B., López Lara, T., & Menchaca Campos, C. (Eds.). *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción*. Barcelona, España: OmniaScience. pp. 95-122.
- Bureau, L., Alliche, A., Pilvin, Ph., Pascal,S., (2001). “Mechanical characterization of a styrene-butadiene modified mortar”. *Materials Science and engineering*. A308:



233-240.

- Castañeda, J., Olague, C., Almeraya, F., Gaona, C., & Martínez, A. (2000). "Análisis comparativo entre el concreto hidráulico simple y el reforzado con fibras de acero". *Revista Ingeniería de Construcción*, 15: 20-27
- Chaocan Zheng, Cong Lou, Geng Du, Xiaozhen Li, Zhiwu Liu, Liqin Li, (2018). "Mechanical Properties of Recycled Concrete with Demolished Waste Concrete Aggregate and Clay Brick Aggregate". *Results in Physics*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.04.061>.
- Chen, Pu-Woei, and Chung, D. D. L. (1996). "A comparative study of concretes reinforced with carbon, polyethylene, and steel fibers and their improvement with latex addition". *ACI Mat. J.*, 93: 129-133.
- Concha-Guzmán, L., Sarmiento-Bustos, E., Menchaca-Campos, C., & Uruchurtu-Chavarin, J. (2015). Cerámicos de reciclaje como sistemas inteligentes de protección contra la corrosión. En Martínez Barrera, G., Hernández Zaragoza, J.B., López Lara, T., & Menchaca Campos, C. (Eds.). *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción*. Barcelona, España: OmniaScience. pp. 43-59.
- Convenio de Basilea, (2011). "Directrices técnicas para el manejo ambiental racional de neumáticos usados y de desecho". *Organización de las Naciones Unidas*.
- Thomas C., Setién J., Polanco J.A, Cimentada A.I, Medina C., (2018). "Influence of curing conditions on recycled aggregate concrete". *Construction and Building Materials*. 172: 618-625.
- Dikeou, J. T. (1978). "Polymers in concrete: new construction achievements on the horizon". *Polymers in concrete*; Proc. 2nd Int. Congr. on Polymers in Concrete, Am. Concrete Inst. (ACI), Detroit, Mich.
- Dirección de servicios generales técnicos, (2014). "*Guía de procedimientos y técnicas para la conservación de carreteras de México*". Secretaria de Comunicaciones y Transportes.
- Dogan M., Bideci A., (2016). "Effect of styrene Butadiene Copolymer (SBR) admixture

- on high strength concrete”. *Construction and Building Materials*. 112: 378-385.
- Dongxing Xuan, Baojian Zhan, Chi Sun Poon, (2017). “Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates”. *Cement and Concrete Composites*. doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.09.015.
- Fangming Deng, Yigang He, Shuangxi Zhou, Yun Yu, Haigen Cheng, Xiang Wu, (2018). “Compressive strength prediction of recycled concrete based on deep learning”. *Construction and Building Materials*. 175: 562–569.
- Freitas C., Alves Galvao J.C., (2009). “Desempenho físico-químico e mecânico de concreto de cimento Portland com borracha de Estireno- Butadieno reciclada de Pneus”. *Quim. Nova*. 32: 913-918.
- Frigione M. (2013). “Chapter 16: Concrete with polymers”. En Pacheco- Torgal, Jalali S., Labrincha J., y Jhon V. M. (Eds.). *Eco-efficient concrete*. Italy: University of Solento. Edit. Woodhead Publishing Limited.
- Ganjian, E.,Khorami, M., Maghsoudi, A.A., (2009). “Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete”. *Construction and building materials*. 23:1828-1836.
- Gesoglu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G., Ipek S., (2014). “Investigating properties of previous concrete containing waste tire rubbers”. *Construction and building materials*. 63: 206-213.
- Ghizdavet Z., Bianca Maria S., Nastac D., Vasile O., Bratu M. (2016). “Sound absorbing materials made by embedding crumb rubber waste in a concrete matrix”. *Construction and Building Materials*. 124: 755-763.
- González-Taboada Iris, González-Fonteboa Belén, Pérez-Ordóñez Juan Luis, Eiras-López Javier, (2017). “Prediction of self-compacting recycled concrete mechanical properties using vibrated recycled concrete experience”. *Construction and Building Materials*. 131:641-654.
- Hernández-Zaragoza, J.B., Delgado-Hernández, J., López-Lara, T., López-Cajún, C., Delgado-Salgado, R., & García-Hernández, E. (2015). Mortero reparador base poliéster y su uso en estructuras de concreto dañadas. En Martínez Barrera, G.,

- Hernández Zaragoza, J.B., López Lara, T., & Menchaca Campos, C. (Eds.). *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción*. Barcelona, España: OmniaScience. pp. 31-41.
- Herrera-Sosa, E.S. (2014). "Waste the particles and gamma radiation as modifiers of the mechanical properties of concrete". *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014. Doi:<http://dx.doi.org/10.1155/2014/327856>.
- Herrera-Sosa E.S., Martínez-Barrera G., Barrera-Díaz C., y Cruz-Zaragoza E. (2015). "Materiales reciclados de llantas automotrices y la radiación gamma en el mejoramiento del concreto". En Martínez Barrera G., Hernández Zaragoza J.B., López Lara T., y Menchaca Campos C., (Eds.). *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción*. Barcelona, España: OmniaScience. 73-93.
- Hui Guo, Caijun Shi, Xuemao Guan, Jianping Zhu, Yahong Ding, Tung-Chai Ling, Haibo Zhang, Yuli Wang, (2018). "Durability of recycled aggregate concrete – A review". *Cement and Concrete Composites*. Doi:10.1016/j.cemconcomp.2018.03.008.
- Rossignolo J.A.(2009). "Interfacial interactions in concretes with silica fume and SBR latex". *Construction and Building Materials*. 23: 817-821.
- Kardon J.B., (1997). "Polymer modified concrete: Review". *Journal of materials in civil engineering*. 8: 85-92.
- Karadelis J.N., Lin Y., (2015). "A comparasion of flexural strengths of polymers (SBR and PVA) modified, roller compacted concrete". *Data in Brief*. 4:422-429.
- Kho Pin Verian, Warda Ashraf, Yizheng Cao, (2018). "Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production". *Resources, Conservation & Recycling*. 133: 30-49.
- Lewis W. J., y Lewis G. (1990). "The influence of polymer latex modifiers on the properties of concrete". *Compos*. 21: 487-494.
- Li J., Zhang Y., Liu G., Peng X., (2017). "Preparation and performance evaluation of an innovative pervious concrete pavement". *Construction and building Materials*. 138: 479-485.

- Li Z., (2011). "Advanced concrete technology". Published by John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA.
- Martínez-López, M., Martínez-Barrera, G., Barrera-Díaz, C.E., & Ureña-Núñez, F. Materiales provenientes del reciclamiento de envases de Tetra Pak y su uso en concreto. En Martínez Barrera, G., Hernández Zaragoza, J.B., López Lara, T., & Menchaca Campos, C. (Eds.). *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción*. Barcelona, España: OmniaScience. pp. 123-143.
- Mazzucco G., Xotta G., Pomaro B., Salomoni V.A., Faleschini F., (2018). "Elastoplastic-damaged meso-scale modelling of concrete with recycled aggregates". *Composites Part B*. 140: 145-156.
- M. John Robert Prince, Govind Gaurav, Bhupinder Singh, (2018). "Splice strength of steel reinforcement embedded in recycled aggregate concrete". *Construction and Building Materials*. 160:156-168.
- Mohsen Ahmadi, Saeed Farzin, Abolfazl Hassani, Mana Motamedi, (2017). "Mechanical properties of the concrete containing recycled fibers and aggregates". *Construction and Building Materials*. 144: 392-398.
- Montejo A., (2002). "Ingeniería de pavimentos". *Universidad Católica de Colombia*, Bogotá, DC.
- Ngoc Kien Bui, Tomoaki Satomi, Hiroshi Takahashi, (2018). "Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate". *Construction and Building Materials*. 163: 496-507.
- Parghi A., Shahria M.A., (2016). "Physical and mechanical proprieties of cementitious composites containing recycled glass powder (RGP) and styrene butadiene rubber (SBR)". *Construction and Building Materials*. 104: 34-43.
- Raffoul S., Reyes García, Pilakoutas K., Guadagnini M., Flores Medina N. (2016). "Optimization of rubberized concrete with high rubber content: An experimental investigation". *Construction and Building Materials*. 124: 391-404.
- Rico Alfonso y Del Castillo Herminio, (1997). "*La ingeniería de suelos en las vías terrestres*". Volumen 2. Editorial Limusa.

- Rozas Patricio y Sánchez Ricardo (2004). *“Desarrollo de Infraestructura y crecimiento económico: revisión conceptual”*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Rupali Subhasmita Padhi, Rakesh Kumar Patra, Bibhuti Bhusan Mukharjee, Tanish Dey, (2018). “Influence of incorporation of rice husk ash and coarse recycled concrete aggregates on properties of concrete”. *Construction and Building Materials*. 173: 289-297.
- Silva R.V., De Brito J., Dhir R.K., (2018). “Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review”. *Construction and Building Materials*. 178: 19-31.
- Saleh Essa M., AbdulAmir A.M., Flah Hassan N., (2012). “Effect of adding (SBR) on concrete properties and Bond Between old and new concrete”. *Kufa Journal of Engineering*. 4: 81-95.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2002). “Materiales para concreto hidráulico M-MMP-2-02-020”. *Método de muestreo y pruebas de materiales*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2002). “Materiales para concreto hidráulico N-CMT-2-02-002/02”. *Características de los materiales*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2004).” Materiales para concreto hidráulico N-CMT-2-02-055/04”. *Muestreo de concreto hidráulico*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2002).” Materiales para concreto hidráulico N-CMT-2-02-001/02”. *Calidad del cemento Portland*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2004).” Materiales para concreto hidráulico N-CMT-2-02-058/04”. *Resistencia a la compresión simple de cilindros de concreto*.
- Segre N., Joekes I. (2000). “Use of tire rubber particles as addition to cement paste”. *Cement and concrete Research*, 30: 1421-1425.
- Shuaicheng Guo, Jiong Hu, Qingli Dai, (2018). “A critical review on the performance of portland cement concrete with recycled organic components”. *Journal of Cleaner Production*, Doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.244.

- Sindy Seara-Paz, Belén González-Fonteboa, Fernando Martínez-Abella, Diego Carro-López, (2018). "Long-term flexural performance of reinforced concrete beams with recycled coarse aggregates". *Construction and Building Materials*. 176: 593-607.
- Sindy Seara-Paz, Belén González-Fonteboa, Fernando Martínez-Abella, Javier Eiras-López, (2018). "Flexural performance of reinforced concrete beams made with recycled concrete coarse aggregate". *Engineering Structures*. 156: 32-45.
- Soon Poh Yap, Paul Zhao Chiat Chen, Yingxin Goh, Hussein Adebayo Ibrahim, Kim Hung Mo, Choon Wah Yuen, (2017). "Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates". *Journal of Cleaner Production*. Doi:10.1016/j.jclepro.2018.01.205.
- Soroushian P., Tlili A., Yohena M., y Tilsen B. L. (1993). "Durability characteristics of polymer-modified glass fiber reinforced concrete". *ACI Mat. J.*, 90: 40-49.
- Sprinkel M. M., (1988b). "High early strength latex modified concrete". *Concrete Constr.*33:831.
- Shi C., y Zheng K., (2007). "A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete". *Conservation and Recycling*. 2007:234-247.
- Viveros-Aguirre S., Rivera-Ortíz I., Álvarez-Castillo A., Menchaca-Campos C., y Uruchurtu Chavarín, J., (2015). "Uso de materiales reciclados para el mejoramiento de las propiedades mecánicas y electroquímicas de concreto reforzado". En Martínez Barrera G., Hernández Zaragoza J.B., López Lara T., & Menchaca Campos, C. (Eds.). *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción*. Barcelona, España: OmniaScience, 61-71.
- U.S. Department of Transportation, (2014). "*Distress identification Manual for the long Term Pavement Performance Program*". Federal Highway Administration.
- Viveros-Aguirre, S., Rivera-Ortíz, I., Álvarez-Castillo, A., Menchaca-Campos, C., & Uruchurtu-Chavarín, J. (2015). Uso de materiales reciclados para el mejoramiento de las propiedades mecánicas y electroquímicas de concreto reforzado. En Martínez Barrera, G., Hernández Zaragoza, J.B., López Lara, T.,

- & Menchaca Campos, C. (Eds.). *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción*. Barcelona, España: OmniaScience. pp. 61-71.
- Vivian W.Y. Tam, Mahfooz Soomro, Ana Catarina Jorge Evangelista, (2018). "A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)". *Construction and Building Materials*. 172: 272–292.
- Wang M., Wang R., Yao H., Farhan S., Zheng S., Wang Z., Du C., Jiang H., (2016). "Research on the mechanism of polymer latex modified cement". *Construction and Building Materials*. 111:710-718.
- Xingzi Liu, Mengpei Yan, Isaac Galobardes, Karol Sikora, (2018). "Assessing the potential of functionally graded concrete using fibre reinforced and recycled aggregate concrete". *Construction and Building Materials*. 171: 793–801.
- Yasser Abdelghany Fawzy, (2016). "Impact of recycled gravel obtained from low or medium concrete grade on concrete properties". *Housing and Building National Research Center*. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrcj.2016.04.003>.
- Zavala-Ramírez, J.J., García-Rodríguez, F.J., Carrillo-Rodríguez, H., Navarrete-Damián, J., Hernández-Zaragoza, J.B., & López-Lara, T. (2015). Uso de residuos agroindustriales para la estabilización de adobes. En Martínez Barrera, G., Hernández Zaragoza, J.B., López Lara, T., & Menchaca Campos, C. (Eds.). *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción*. Barcelona, España: OmniaScience. pp. 11-30.
- Zhang F., Hu C., (2013). "The research for SBS and SBR compound modified asphalts with polyphosphoric acid and sulfur". *Construction and Building Materials*. 23: 461-468.
- Zine-el-abidine Tahar, Tien-Tung Ngo, El Hadj Kadri, Adrien Bouvet, Farid Debieb, Salima Aggoun, (2017). "Effect of cement and admixture on the utilization of recycled aggregates in concrete". *Construction and Building Materials*. 149: 91-102.

## ANEXOS

### Anexo A. Ficha técnica de aditivo fluidificante.

Hoja Técnica  
Edición 2010/2011-01  
Identificación no. 401010, 401192, 401195, 401197.  
SikaCem

## SikaCem

Línea de aditivos en polvo para mejorar las características de los concretos y morteros en estado fresco y endurecido. En envase biodegradable.

Construcción

<b>Descripción</b>	Línea de aditivos en polvo para mejorar las características de los concretos y morteros tanto en estado fresco como endurecidos, como: fluidez de la mezcla, acelerar fraguado, reducir permeabilidad y disminuir el agrietamiento. La presentación de esta línea de productos es por saco de cemento de 50 kg.
<b>Usos</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ <b>SikaCem Fluidificante:</b> aditivo fluidificante de concretos o morteros el cual incrementa el revenimiento o disminuye el consumo de agua en un 10% aprox.</li><li>■ <b>SikaCem Acelerante:</b> aditivo acelerante de fraguado para concretos y morteros.</li><li>■ <b>SikaCem Impermeabilizante:</b> aditivo impermeabilizante integral para concretos y morteros.</li><li>■ <b>SikaCem Fiber:</b> fibras para disminuir el agrietamiento por contracción plástica en concretos y morteros.</li></ul>
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Fácil de utilizar ya que la bolsa contiene la cantidad adecuada por saco de cemento de 50 kg.</li><li>■ Producto ecológico ya que se encuentra en un empaque biodegradable por lo que ayuda a la conservación del medio ambiente reduciendo los desechos.</li><li>■ Facilidad, limpieza y rapidez en su aplicación.</li><li>■ Se aplica durante el mezclado directamente sobre el concreto o mortero.</li></ul>
<b>Modo de empleo</b>	<p>Colocar una bolsa de <b>SikaCem Fluidificante</b>, <b>SikaCem Acelerante</b>, <b>SikaCem Impermeabilizante</b> o <b>SikaCem Fiber</b> a la mezcla de concreto o mortero por saco de cemento que se utilice en la mezcla. Agréguelo directamente sobre el cemento y agregados, previo a la adición de agua.</p> <p>Solamente el <b>SikaCem Fluidificante</b> se puede colocar directamente en el agua de mezcla si lo requiere para reducir consumos de agua.</p> <p>Para asegurar la correcta integración de los aditivos se recomienda mezclar por 3 minutos adicionales.</p>
<b>Consumo</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ <b>SikaCem Fluidificante:</b> Una bolsa de 200 gr. por saco de cemento de 50 kg.</li><li>■ <b>SikaCem Acelerante:</b> Una bolsa de 250 gr. por saco de cemento de 50 kg.</li><li>■ <b>SikaCem Impermeabilizante:</b> Una bolsa de 150 gr. por saco de cemento de 50 kg.</li><li>■ <b>SikaCem Fiber:</b> Una bolsa de 100 gr. por saco de cemento de 50 kg.</li></ul>

### Datos Técnicos

<b>SikaCem Fluidificante:</b>	<b>Tipo:</b> Aditivo en polvo. <b>Color:</b> Café claro.
<b>SikaCem Acelerante:</b>	<b>Tipo:</b> Aditivo en polvo. <b>Color:</b> Blanco.





**SikaCem Impemeabilizante:** Tipo: Aditivo en polvo con base en sustancias hidrófugas.

Color: Ligeramente rosa.

**SikaCem Fiber:** Tipo: Fibras de polipropileno.

Color: Blanco.

## Precauciones

- Para asegurar resultados óptimos de los concretos y morteros, siga la metodología adecuada en el diseño, elaboración, colocación, compactación, la menor cantidad posible de agua y principalmente en el curado continuo durante 7 días. Se recomienda que el contenido de cemento no sea inferior a 250 kg por m<sup>3</sup> de concreto.
- Una sobre-dosificación de **SikaCem Fluidificante** puede causar retardo de fraguado.
- El desempeño de los aditivos puede tener variaciones debido al tipo, origen y cantidades de los materiales utilizados en el diseño del concreto o mortero.
- Los aditivos de la línea SikaCem son sensibles a la humedad por lo que se pueden endurecer sin afectar su desempeño, si este es el caso hay que disolverlo primero en agua. Se recomienda una vez abierta la caja consumir las 40 bolsas preferentemente antes de un mes.

## Medidas de Seguridad y desecho de residuos

En caso de contacto con la piel lave la zona afectada inmediatamente con agua y jabón.

En caso de contacto con los ojos lave inmediatamente con agua abundante durante 15 minutos y acuda inmediatamente al médico. En caso de ingestión no provoque el vómito y acuda al médico.

Para mayor información y en caso de derrames consulte la hoja de seguridad.

## Almacenamiento

Seis (6) meses en su envase original, bien cerrado, bajo techo, en lugar seco y fresco.

## Nota Legal

Toda la información contenida en este documento y en cualquiera otra asesoría proporcionada, fue dada de buena fe, basada en el conocimiento actual y la experiencia de Sika Mexicana de los productos siempre y cuando hayan sido correctamente almacenados, manejados y aplicados en situaciones normales y de acuerdo a las recomendaciones de Sika Mexicana. La información es válida únicamente para la(s) aplicación(es) y el(los) producto(s) a los que se hace expresamente referencia. En caso de cambios en los parámetros de la aplicación, como por ejemplo cambios en los sustratos, o en caso de una aplicación diferente, consulte con el Servicio Técnico de Sika Mexicana previamente a la utilización de los productos Sika. La información aquí contenida no exonera al usuario de hacer pruebas sobre los productos para la aplicación y la finalidad deseadas. En todo caso referirse siempre a la última versión vigente de la Hoja Técnica del Producto. Los pedidos son aceptados en conformidad con los términos de nuestras condiciones generales vigentes de venta y suministro.

Para dudas o aclaraciones:

**Sika responde**  
**01 800 123 SIK**  
7 4 5 2  
 soporte.tecnico@mx.sika.com  
 sika.responde@mx.sika.com  
**www.sika.com.mx**



## Anexo B. Proporcionamiento de concreto Método ACI

CEMENTO		
Cemento tipo I		
F'c	300	kg/cm2
Peso especifico	1.5	gr/cm3
Peso especifico agua	1000	kg/cm3

AGREGADOS	FINO (ARENA)		GRUESO (BASALTO)	
Perfil				Angular
Peso unitario suelto	1210.94	kg/m3	1410.72	kg/m3
Peso unitario compactado	1398.44	kg/m3	1500.36	kg/m3
Peso especifico	1500	kg/m3	2610	kg/m3
Modulo de fineza	2.49		5.46	"
Tamaño maximo nominal			1.5	
Porcentaje de absorcion	14.98	%	0.722	%
Porcentaje de humedad	4.04	%	1.7	%

Resistencia promedio requerida			
F'c			
< 210	Si es necesario		370
210 - 350	iterpolar		384
>350			398
	TMN	TMN	SLUMP
			181

RELACION AGUA CEMENTO			
Fc'r			384
Si es necesario iterpolar	350	0.480	
	384	0.446	a/c
	400	0.430	

CONTENIDO AGUA CEMENTO		
c =	405.829596	kg
Factor C=	9.549	bolsas

PESO AGREGADO GRUESO			
Módulo de fineza	2.490		Tabla 04
TMN	1.500		
Si es necesario iterpolar	2.400	0.760	0.751
	2.490	0.751	m3
	2.600	0.740	1126.770
			kg

PESO AGREGADO FINO			Volumenes	
Agua	181.000	lts	0.181	m3
Cemento	405.830	kg	0.271	m3
Peso agregado grueso	1126.770	kg	0.432	
Aire	1.000	%	0.010	m3
Peso agregado fino	160.101	kg	0.107	m3

PRESENTACION DEL DISEÑO EN ESTADO SECO		
Agua	181.000	lts
Cemento	405.830	kg
Peso agregado grueso	1126.770	kg
Peso agregado fino	160.101	kg

CORRECCION POR HUMEDAD		
Peso agregado grueso	1145.925	kg
Peso agregado fino	166.569	kg

APORTE DE AGUA A LA MEZCLA		
Peso agregado grueso	11.020	Lts
Peso agregado fino	-17.515	Lts
Total	-6.495	Lts
AGUA EFECTIVA		

Agua	187.495	Its
------	---------	-----

PROPORCIONAMIENTO DEL DISEÑO			
Composición	Masa		Proporcion
Cemento	405.83	kg	1.00
Agregado grueso	1145.93	kg	0.41
Agregado fino	166.57	kg	2.82
Agua	187.50	Its	19.64

Anexo C. Cálculo de dosificaciones de concreto sin aditivos (Fase II) y con aditivos (Fase III).

Volumen de cilindros			Volumen de vigas		
Diámetro	10	cm	Largo	50	cm
Radio	5	cm	Ancho	15	cm
Altura	20	cm	Altura	15	cm
$\pi$	3.1416				
Vol por cilindro	1570.80	cm <sup>3</sup>	Vol por viga	11250.00	cm <sup>3</sup>
Vol total	0.0015708	m <sup>3</sup>	Vol total	0.01125	m <sup>3</sup>
	15707.9633	cm <sup>3</sup>		112500	cm <sup>3</sup>
	0.01570796	m <sup>3</sup>		0.1125	m <sup>3</sup>

<b>Mezcla EA (Base)</b>	<b>Material</b>	<b>M3</b>		<b>Cilindros 12</b>		<b>Vigas 2</b>		<b>Dosificación total</b>	
	Agua	187.495	lts	3.534	lts	4.219	lts	7.753	lts
	Cemento	405.830	kg	7.650	kg	9.131	kg	16.781	kg
	Peso agregado grueso	1145.925	kg	21.600	kg	25.783	kg	47.384	kg
	Aire	1.000	%	0.019		0.023		0.041	
	Peso agregado fino	166.569	kg	3.140	kg	3.748	kg	6.888	kg

<b>Mezcla EB (5% de SBR)</b>	<b>Material</b>	<b>M3</b>		<b>Cilindros 12</b>		<b>Vigas 2</b>		<b>Dosificación total</b>	
	Agua	187.495	lts	3.534	lts	4.219	lts	8.528	lts
	Cemento	405.830	kg	7.650	kg	9.131	kg	18.459	kg
	Peso agregado grueso	1145.925	kg	21.600	kg	25.783	kg	52.122	kg
	Aire	1.000	%	0.019		0.023		0.045	
	Peso agregado fino	158.241	kg	2.983	kg	3.560	kg	7.198	kg
	Caucho estireno butadieno	8.328466	kg	0.157	kg	0.187	kg	0.379	kg

<b>Mezcla EC (25% de SBR)</b>	<b>Material</b>	<b>M3</b>		<b>Cilindros 12</b>		<b>Vigas 2</b>		<b>Dosificación total</b>	
	Agua	187.495	lts	3.534	lts	4.219	lts	8.528	lts
	Cemento	405.830	kg	7.650	kg	9.131	kg	18.459	kg
	Peso agregado grueso	1145.925	kg	21.600	kg	25.783	kg	52.122	kg
	Aire	1.000	%	0.019		0.023		0.045	
	Peso agregado fino	124.927	kg	2.355	kg	2.811	kg	5.682	kg
Caucho estireno butadieno	41.64233	kg	0.785	kg	0.937	kg	1.894	kg	

<b>Mezcla ED (15% de SBR)</b>	<b>Material</b>	<b>M3</b>		<b>Cilindros 12</b>		<b>Vigas 2</b>		<b>Dosificación total</b>	
	Agua	187.495	lts	3.534	lts	4.219	lts	8.528	lts
	Cemento	405.830	kg	7.650	kg	9.131	kg	18.459	kg
	Peso agregado grueso	1145.925	kg	21.600	kg	25.783	kg	52.122	kg
	Aire	1.000	%	0.019		0.023		0.045	
	Peso agregado fino	141.584	kg	2.669	kg	3.186	kg	6.440	kg
	Caucho estireno butadieno	24.985398	kg	0.471	kg	0.562	Kg	1.136	kg

<b>Mezcla EE (5% de SBR + sika)</b>	<b>Material</b>	<b>M3</b>		<b>Cilindros 12</b>		<b>Vigas 2</b>		<b>Dosificación total</b>	
	Agua	187.495	lts	3.534	lts	4.219	lts	8.528	lts
	Cemento	405.830	kg	7.650	kg	9.131	kg	18.459	kg
	Peso agregado grueso	1145.925	kg	21.600	kg	25.783	kg	52.122	kg
	Aire	1.000	%	0.019		0.023		0.045	
	Peso agregado fino	158.241	kg	2.983	kg	3.560	kg	7.198	kg
	Caucho estireno butadieno	8.328466	kg	0.157	kg	0.187	kg	0.379	kg
	sika acelerante	125	gr						
sika fluidificante	100	gr							

<b>Mezcla EF (base + sika)</b>	<b>Material</b>	<b>M3</b>		<b>Cilindros 12</b>		<b>Vigas 2</b>		<b>Dosificación total</b>	
	Agua	187.495	lts	3.534	lts	4.219	lts	8.528	lts
	Cemento	405.830	kg	7.650	kg	9.131	kg	18.459	kg
	Peso agregado grueso	1145.925	kg	21.600	kg	25.783	kg	52.122	kg
	Aire	1.000	%	0.019		0.023		0.045	
	Peso agregado fino	166.569	kg	3.140	kg	3.748	kg	7.576	kg
	Caucho estireno butadieno	0	kg	0.000	kg	0.000	kg	0.000	kg
	sika acelerante	125	gr						
sika fluidificante	100	gr							

<b>Mezcla EG (25% de SBR + sika)</b>	<b>Material</b>	<b>M3</b>		<b>Cilindros 12</b>		<b>Vigas 2</b>		<b>Dosificación total</b>	
	Agua	187.495	lts	3.534	lts	4.219	lts	8.528	lts
	Cemento	405.830	kg	7.650	kg	9.131	kg	18.459	kg
	Peso agregado grueso	1145.925	kg	21.600	kg	25.783	kg	52.122	kg
	Aire	1.000	%	0.019		0.023		0.045	
	Peso agregado fino	124.927	kg	2.355	kg	2.811	kg	5.682	kg
	Caucho estireno butadieno	41.64233	kg	0.785	kg	0.937	kg	1.894	kg
	sika acelerante	125	gr						
	sika fluidificante	100	gr						

## Anexo D. Resistencia a la compresión cilindros de concreto

Mues Nº	Prueba Fecha	Díe de curad	Pes o Kg	Diámetro (mm)			P ro med cm	Altura (mm)			P ro med cm	A rea cm2	Carga kN	Carga ton	Carga kg	Resiste ia kg/cm2	Resiste a promedio
				1	2	3		1	2	3							
EA1	19/09/2018	7	3.67	100.000	99.000	101.000	10.000	199.000	199.000	200.000	19.933	78.540	148.619	15.155	15154.977	192.959	203.765
EA2	19/09/2018	7	3.68	100.000	99.000	101.000	10.000	200.000	200.000	201.000	20.033	78.540	156.387	15.947	15947.095	203.045	
EA3	19/09/2018	7	3.68	100.000	100.000	100.000	10.000	199.000	200.000	201.000	20.000	78.540	165.827	16.910	16909.711	215.301	
EA4	26/09/2018	14	3.67	100.000	99.000	98.000	9.900	199.000	199.000	200.000	19.933	76.977	203.472	20.748	20748.447	269.541	267.832
EA5	26/09/2018	14	3.74	100.000	100.000	100.000	10.000	200.000	200.000	200.000	20.000	78.540	205.182	20.923	20922.819	266.398	
EA6	26/09/2018	14	3.74	100.000	100.000	100.000	10.000	201.000	199.000	199.000	19.967	78.540	206.074	21.014	21013.778	267.556	
EA7	03/10/2018	21	3.75	100.000	100.000	100.000	10.000	201.000	200.000	201.000	20.067	78.540	206.967	21.105	21104.839	268.715	261.811
EA8	02/10/2018	21	3.74	100.000	101.000	100.000	10.033	200.000	201.000	202.000	20.100	79.064	197.642	20.154	20153.950	254.906	
EA9	09/10/2018	28	3.74	100.000	102.000	102.000	10.133	200.000	201.000	201.000	20.067	80.648	227.251	23.173	23173.239	287.337	292.547
EA10	09/10/2018	28	3.75	100.000	100.000	100.000	10.000	200.000	201.000	201.000	20.067	78.540	254.640	25.966	25966.150	330.611	
EA11	09/10/2018	28	3.74	102.000	102.000	100.000	10.133	199.000	201.000	201.000	20.033	80.648	205.388	20.944	20943.825	259.694	
EB1	20/09/2018	7	3.66	100.000	100.000	101.000	10.033	200.000	199.000	202.000	20.033	79.064	111.828	11.403	11403.325	144.229	150.354
EB2	20/09/2018	7	3.65	100.000	101.000	99.000	10.000	200.000	201.000	201.000	20.067	78.540	121.856	12.426	12425.900	158.211	
EB3	20/09/2018	7	3.67	100.000	99.000	101.000	10.000	199.000	199.000	199.000	19.900	78.540	114.469	11.673	11672.633	148.621	
EB4	27/09/2018	14	3.57	99.000	99.000	101.000	9.967	200.000	199.000	202.000	20.033	78.017	164.156	16.739	16739.316	214.560	205.195
EB5	27/09/2018	14	3.65	100.000	101.000	100.000	10.033	200.000	199.000	202.000	20.033	79.064	141.079	14.386	14386.108	181.955	
EB6	27/09/2018	14	3.53	98.000	98.000	100.000	9.867	200.000	201.000	201.000	20.067	76.459	164.270	16.751	16750.940	219.083	
EB7	04/10/2018	21	3.64	100.000	102.000	100.000	10.067	201.000	201.000	201.000	20.100	79.591	141.000	14.378	14378.052	180.650	169.371
EB8	04/10/2018	21	3.69	99.000	101.000	100.000	10.000	201.000	201.000	202.000	20.133	78.540	120.490	12.287	12286.606	156.438	
EB9	04/10/2018	21	3.57	100.000	98.000	99.000	9.900	200.000	200.000	200.000	20.000	76.977	129.103	13.165	13164.891	171.024	
EB10	11/10/2018	28	3.62	100.000	99.000	100.000	9.967	199.000	199.000	200.000	19.933	78.017	121.460	12.386	12385.519	158.754	177.960
EB11	11/10/2018	28	3.63	100.000	100.000	101.000	10.033	199.000	199.000	199.000	19.900	79.064	147.020	14.992	14991.923	189.617	
EB12	11/10/2018	28	3.66	100.000	100.000	99.000	9.967	199.000	198.000	200.000	19.900	78.017	141.930	14.473	14472.886	185.509	
EC1	03/10/2018	7	3.55	100.000	100.000	102.000	10.067	201.000	201.000	200.000	20.067	79.591	141.972	14.477	14477.169	181.896	185.382
EC2	03/10/2018	7	3.55	98.000	98.000	99.000	9.833	200.000	200.000	200.000	20.000	75.944	152.190	15.519	15519.119	204.350	
EC3	03/10/2018	7	3.57	100.000	101.000	101.000	10.067	201.000	201.000	202.000	20.133	79.591	132.608	13.522	13522.303	169.898	
EC4	10/10/2018	14	3.58	100.000	99.000	99.000	9.933	200.000	201.000	201.000	20.067	77.496	169.388	17.273	17272.833	222.886	213.588
EC5	10/10/2018	14	3.59	100.000	100.000	102.000	10.067	200.000	201.000	201.000	20.067	79.591	172.703	17.611	17610.870	221.268	
EC6	10/10/2018	14	3.63	101.000	102.000	101.000	10.133	201.000	200.000	200.000	20.033	80.648	155.495	15.856	15856.136	196.609	
EC7	17/10/2018	21	3.61	100.000	100.000	100.000	10.000	200.000	201.000	200.000	20.033	78.540	175.969	17.944	17943.911	228.469	223.003
EC8	17/10/2018	21	3.67	100.000	100.000	100.000	10.000	200.000	201.000	201.000	20.067	78.540	157.677	16.079	16078.639	204.720	
EC9	17/10/2018	21	3.61	100.000	100.000	101.000	10.033	200.000	201.000	199.000	20.000	79.064	182.845	18.645	18645.070	235.822	
EC10	24/10/2018	28	3.67	100.000	101.000	101.000	10.067	199.000	200.000	200.000	19.967	79.591	208.524	21.264	21263.609	267.163	265.414
EC11	24/10/2018	28	3.54	99.000	100.000	99.000	9.933	200.000	199.000	199.000	19.933	77.496	199.199	20.313	20312.720	262.113	
EC12	24/10/2018	28	3.57	99.000	100.000	100.000	9.967	200.000	200.000	200.000	20.000	78.017	204.251	20.828	20827.883	266.966	
ED1	07/10/2018	7	3.65	100.000	100.000	102.000	10.067	202.000	201.000	200.000	20.100	79.591	132.494	13.511	13510.678	169.752	177.167
ED2	07/10/2018	7	3.58	100.000	99.000	99.000	9.933	201.000	200.000	200.000	20.033	77.496	136.806	13.950	13950.381	180.014	
ED3	07/10/2018	7	3.69	100.000	101.000	102.000	10.100	200.000	202.000	201.000	20.100	80.118	142.788	14.560	14560.378	181.736	
ED4	14/10/2018	14	3.6	100.000	100.000	100.000	10.000	199.000	199.000	200.000	19.933	78.540	149.641	15.259	15259.192	194.286	187.241
ED5	14/10/2018	14	3.65	98.000	98.000	100.000	9.867	200.000	200.000	200.000	20.000	76.459	149.756	15.271	15270.919	199.726	
ED6	14/10/2018	14	3.57	99.000	99.000	101.000	9.967	200.000	200.000	200.000	20.000	78.017	128.312	13.084	13084.231	167.710	
ED7	21/10/2018	21	3.6	100.000	100.000	100.000	10.000	200.000	201.000	200.000	20.033	78.540	170.879	17.425	17424.873	221.860	258.752
ED8	21/10/2018	21	3.59	100.000	100.000	100.000	10.000	199.000	199.000	199.000	19.900	78.540	264.896	27.012	27011.975	343.927	
ED9	21/10/2018	21	3.68	101.000	100.000	100.000	10.033	201.000	201.000	201.000	20.100	79.064	163.187	16.641	16640.505	210.468	
ED10	28/10/2018	28	3.59	100.000	100.000	99.000	9.967	199.000	201.000	200.000	20.000	78.017	162.294	16.549	16549.444	212.126	222.238
ED11	28/10/2018	28	3.62	101.000	101.000	100.000	10.067	199.000	200.000	201.000	20.000	79.591	172.512	17.591	17591.394	221.024	
ED12	28/10/2018	28	3.61	100.000	100.000	101.000	10.033	200.000	201.000	200.000	20.033	79.064	181.097	18.467	18466.823	233.567	



EE1	07/10/2018	7	3.58	100.000	98.000	100.000	9.933	198.000	198.000	200.000	19.867	77.496	161.592	16.478	16477.859	212.628	211.110
EE2	07/10/2018	7	3.56	101.000	101.000	101.000	10.100	198.000	200.000	200.000	19.933	80.118	177.831	18.134	18133.783	226.337	
EE3	07/10/2018	7	3.56	100.000	100.000	100.000	10.000	198.000	198.000	200.000	19.867	78.540	149.702	15.265	15265.412	194.365	
EE4	14/10/2018	14	3.58	99.000	99.000	100.000	9.933	199.000	200.000	200.000	19.967	77.496	144.970	14.783	14782.881	190.756	203.326
EE5	14/10/2018	14	3.65	99.000	100.000	100.000	9.967	201.000	200.000	201.000	20.067	78.017	146.760	14.965	14965.411	191.822	
EE6	14/10/2018	14	3.55	98.000	100.000	99.000	9.900	199.000	198.000	198.000	19.833	76.977	171.660	17.505	17504.514	227.400	
EE7	21/10/2018	21	3.7	101.000	100.000	101.000	10.067	201.000	200.000	199.000	20.000	79.591	171.734	17.512	17512.059	220.027	194.953
EE8	21/10/2018	21	3.63	100.000	100.000	100.000	10.000	200.000	200.000	198.000	19.933	78.540	158.875	16.201	16200.802	206.275	
EE9	21/10/2018	21	3.62	100.000	100.000	100.000	10.000	200.000	201.000	201.000	20.067	78.540	122.123	12.453	12453.127	158.558	
EE10	28/10/2018	28	3.61	100.000	100.000	100.000	10.000	201.000	200.000	199.000	20.000	78.540	201.648	20.562	20562.450	261.809	244.432
EE11	28/10/2018	28	3.63	100.000	100.000	100.000	10.000	200.000	201.000	201.000	20.067	78.540	167.422	17.072	17072.356	217.372	
EE12	28/10/2018	28	3.56	98.000	99.000	99.000	9.867	199.000	199.000	200.000	19.933	76.459	190.537	19.429	19429.439	254.115	
EF1	08/10/2018	7	3.68	100.000	100.000	100.000	10.000	202.000	201.000	201.000	20.133	78.540	130.937	13.352	13352.908	170.002	221.038
EF2	08/10/2018	7	3.56	100.000	100.000	99.000	9.967	200.000	199.000	201.000	20.000	78.017	181.403	18.498	18498.027	237.102	
EF3	08/10/2018	7	3.66	100.000	101.000	100.000	10.033	200.000	201.000	199.000	20.000	79.064	198.497	20.241	20241.136	256.009	
EF4	15/10/2018	14	3.62	98.000	99.000	100.000	9.900	200.000	198.000	198.000	19.867	76.977	134.280	13.693	13692.800	177.882	186.602
EF5	15/10/2018	14	3.64	99.000	99.000	99.000	9.900	200.000	199.000	201.000	20.000	76.977	133.810	13.645	13644.873	177.259	
EF6	15/10/2018	14	3.6	98.000	99.000	99.000	9.867	199.000	200.000	200.000	19.967	76.459	153.460	15.649	15648.623	204.666	
EF7	22/10/2018	21	3.63	99.000	99.000	99.000	9.900	200.000	201.000	199.000	20.000	76.977	169.055	17.239	17238.876	223.949	222.981
EF8	22/10/2018	21	3.6	99.000	99.000	99.000	9.900	198.000	198.000	198.000	19.800	76.977	164.782	16.803	16803.150	218.288	
EF9	22/10/2018	21	3.64	99.000	98.000	99.000	9.867	200.000	199.000	199.000	19.933	76.459	169.986	17.334	17333.812	226.706	
EF10	29/10/2018	28	3.65	100.000	101.000	99.000	10.000	199.000	201.000	199.000	19.967	78.540	225.504	22.995	22995.094	292.783	260.403
EF11	29/10/2018	28	3.67	100.000	100.000	100.000	10.000	201.000	201.000	200.000	20.067	78.540	168.277	17.160	17159.542	218.482	
EF12	29/10/2018	28	3.62	100.000	100.000	101.000	10.033	200.000	201.000	200.000	20.033	79.064	209.303	21.343	21343.046	269.945	
EG1	08/10/2018	7	3.54	100.000	101.000	101.000	10.067	200.000	201.000	200.000	20.033	79.591	101.023	10.302	10301.517	129.431	141.936
EG2	08/10/2018	7	3.48	100.000	100.000	98.000	9.933	198.000	198.000	199.000	19.833	77.496	131.792	13.439	13439.094	173.416	
EG3	08/10/2018	7	3.45	101.000	100.000	101.000	10.067	199.000	198.000	202.000	19.967	79.591	95.971	9.786	9786.355	122.959	
EG4	15/10/2018	14	3.52	100.000	99.000	99.000	9.933	199.000	199.000	200.000	19.933	77.496	122.660	12.508	12507.886	161.400	163.104
EG5	15/10/2018	14	3.46	99.000	98.000	100.000	9.900	200.000	199.000	200.000	19.967	76.977	139.600	14.235	14235.291	184.929	
EG6	15/10/2018	14	3.45	98.000	100.000	98.000	9.867	199.000	199.000	200.000	19.933	76.459	107.210	10.932	10932.418	142.983	
EG7	22/10/2018	21	3.43	99.000	100.000	98.000	9.900	198.000	198.000	200.000	19.867	76.977	130.667	13.324	13324.375	173.096	152.282
EG8	22/10/2018	21	3.61	100.000	100.000	101.000	10.033	199.000	199.000	201.000	19.967	79.064	96.406	9.831	9830.713	124.338	
EG9	22/10/2018	21	3.48	99.000	99.000	99.000	9.900	200.000	201.000	199.000	20.000	76.977	120.337	12.271	12271.005	159.412	
EG10	29/10/2018	28	3.55	100.000	101.000	101.000	10.067	200.000	201.000	201.000	20.067	79.591	153.740	15.677	15677.175	196.973	174.026
EG11	29/10/2018	28	3.58	100.000	100.000	99.000	9.967	201.000	201.000	202.000	20.133	78.017	131.563	13.416	13415.742	171.959	
EG12	29/10/2018	28	3.59	100.000	100.000	101.000	10.033	201.000	201.000	200.000	20.067	79.064	118.742	12.108	12108.359	153.146	

## Anexo E. Resistencia a la flexión en vigas de concreto

Muestra Nº	Prueba Fecha	Días de curado	Peso Kg	Ancho (mm)			P ro medio cm	Altura (mm)			P ro medio cm	Longitud (mm)			P ro medio cm	A rea cm2	Carga kN	Carga ton	Carga kg	M ó dulo de ruptura	M ó dulo de ruptura pro medio
				1	2	3		1	2	3		1	2	3							
EA1	2018-10-09	28	26.60	151.00	151.00	150.00	15.07	150.00	151.00	150.00	15.03	500.00	501.00	501.00	50.07	754.338	33.240	3.390	3389.549	44.86	42.77
EA2	2018-10-09	28	26.71	150.00	150.00	151.00	15.03	150.00	150.00	150.00	15.00	502.00	502.00	502.00	50.20	754.673	29.866	3.045	3044.884	40.68	
EB1	2018-10-11	28	25.70	151.00	151.00	149.00	15.03	150.00	150.00	150.00	15.00	501.00	501.00	501.00	50.10	753.170	26.790	2.732	2731.830	36.42	33.82
EB2	2018-10-11	28	25.48	149.00	149.00	150.00	14.93	148.00	149.00	149.00	14.87	500.00	500.00	501.00	50.03	747.164	22.430	2.287	2287.232	31.21	
EC1	2018-10-24	28	25.73	150.00	151.00	151.00	15.07	150.00	150.00	151.00	15.03	500.00	500.00	500.00	50.00	753.333	31.250	3.187	3186.625	42.11	38.66
EC2	2018-10-24	28	25.66	151.00	150.00	149.00	15.00	149.00	150.00	151.00	15.00	500.00	500.00	500.00	50.00	750.000	25.890	2.640	2640.055	35.20	
ED1	2018-10-28	28	25.80	150.00	151.00	149.00	15.00	150.00	150.00	149.00	14.97	501.00	500.00	501.00	50.07	751.000	25.890	2.640	2640.055	35.41	35.41
ED2	2018-10-28	28	26.08	149.00	149.00	150.00	14.93	151.00	149.00	150.00	15.00	501.00	501.00	500.00	50.07	747.662	25.890	2.640	2640.055	35.41	
EE1	2018-10-28	28	25.71	151.00	150.00	151.00	15.07	150.00	151.00	150.00	15.03	500.00	500.00	499.00	49.97	752.831	28.470	2.900	2903.143	38.34	35.12
EE2	2018-10-28	28	25.44	150.00	150.00	151.00	15.03	149.00	150.00	149.00	14.93	499.00	500.00	500.00	49.97	751.166	23.320	2.376	2377.967	31.90	
EF1	2018-10-29	28	25.55	150.00	150.00	151.00	15.03	148.00	148.00	148.00	14.80	500.00	500.00	500.00	50.00	751.667	24.110	2.455	2458.545	33.60	38.83
EF2	2018-10-29	28	25.35	150.00	151.00	151.00	15.07	149.00	149.00	149.00	14.90	500.00	500.00	499.00	49.97	752.831	32.140	3.277	3277.380	44.00	
EG1	2018-10-29	28	24.19	149.00	149.00	149.00	14.90	148.00	148.00	148.00	14.80	499.00	500.00	500.00	49.97	744.503	25.000	2.549	2549.300	35.12	33.46
EG2	2018-10-29	28	24.49	149.00	150.00	150.00	14.97	151.00	149.00	149.00	14.97	500.00	501.00	500.00	50.03	748.832	23.210	2.367	2366.770	31.79	

Anexo F. Evidencia fotográfica de los ensayos a cilindros.

Fotografías



A1. Ensayo a compresión a los siete días en concreto de concreto base.



A2. Ensayo a compresión a los catorce días en concreto de concreto base.



A3. Ensayo a compresión a los veintiún días en concreto de concreto base.



A4. Ensayo a compresión a los veintiocho días en concreto de concreto base.



A5. Ensayo a flexión a los veintiocho días en concreto de concreto base.



A6. Ensayo a flexión a los veintiocho días en concreto de concreto base.

## Fotografías



B1. Ensayo a compresión a los siete días en concreto con 5% de SBR y sin aditivos.



B2. Ensayo a compresión a los catorce días en concreto con 5% de SBR y sin aditivos.



B3. Ensayo a compresión a los veintiún días en concreto con 5% de SBR y sin aditivos.



B4. Ensayo a compresión a los veintiocho días en concreto con 5% de SBR y sin aditivos.



B5. Ensayo a flexión a los veintiocho días en concreto con 5% de SBR y sin aditivos.



B6. Ensayo a flexión a los veintiocho días en concreto con 5% de SBR y sin aditivos.

## Fotografías



C1. Ensayo a compresión a los siete días en concreto con 25% de SBR y sin aditivos.



C2. Ensayo a compresión a los catorce días en concreto con 25% de SBR y sin aditivos.



C3. Ensayo a compresión a los veintiún días en concreto con 25% de SBR y sin aditivos.



C4. Ensayo a compresión a los veintiocho días en concreto con 25% de SBR y sin aditivos.



C5. Ensayo a flexión a los veintiocho días en concreto con 25% de SBR y sin aditivos



C6. Ensayo a flexión a los veintiocho días en concreto con 25% de SBR y sin aditivos.

## Fotografías



D1. Ensayo a compresión a los siete días en concreto con 15% de SBR y sin aditivos.



D2. Ensayo a compresión a los catorce días en concreto con 15% de SBR y sin aditivos.



D3. Ensayo a compresión a los veintiún días en concreto con 15% de SBR y sin aditivos.



D4. Ensayo a compresión a los veintiocho días en concreto con 15% de SBR y sin aditivos.



D5. Ensayo a flexión a los veintiocho días en concreto con 15% de SBR y sin aditivos.



D6. Ensayo a flexión a los veintiocho días en concreto con 15% de SBR y sin aditivos.

## Fotografías



E1. Ensayo a compresión a los siete días en concreto con 5% de SBR y con aditivos.



E2. Ensayo a compresión a los catorce días en concreto con 5% de SBR y con aditivos.



E3. Ensayo a compresión a los veintiún días en concreto con 5% de SBR y con aditivos.



E4. Ensayo a compresión a los veintiocho días en concreto con 5% de SBR y con aditivos.



E5. Ensayo a flexión a los veintiocho días en concreto con 5% de SBR y con aditivos.



E6. Ensayo a flexión a los veintiocho días en concreto con 5% de SBR y con aditivos.



## Fotografías



F1. Ensayo a compresión a los siete días en concreto base con aditivos.



F2. Ensayo a compresión a los catorce días en concreto base con aditivos.



F3. Ensayo a compresión a los veintiún días en concreto base con aditivos.



F4. Ensayo a compresión a los veintiocho días en concreto base con aditivos.



F5. Ensayo a flexión a los veintiocho días en concreto base con aditivos.



F6. Ensayo a flexión a los veintiocho días en concreto base con aditivos.



## Fotografías



G1. Ensayo a compresión a los siete días en concreto con 25% de SBR con aditivos.



G2. Ensayo a compresión a los catorce días en concreto con 25% de SBR con aditivos.



G3. Ensayo a compresión a los veintiún días en concreto con 25% de SBR con aditivos.



G4. Ensayo a compresión a los veintiocho días en concreto con 25% de SBR con aditivos.



G5. Ensayo a flexión a los veintiocho días en concreto con 25% de SBR con aditivos.



G6. Ensayo a flexión a los veintiocho días en concreto con 25% de SBR con aditivos.