

Ing. Abraham Miranda
Reséndiz

Geomalla de PET como refuerzo estructural en pavimentos
rígidos.

2020



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Geomalla de PET como refuerzo estructural en
pavimentos rígidos.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Ing. Abraham Miranda Reséndiz

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

C.U., Querétaro, Qro., Julio 2020



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

Geomalla de PET como refuerzo estructural en pavimentos rígidos

Opción de titulación

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería

Presenta:

Ing. Abraham Miranda Reséndiz

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Presidente

Dr. Omar Chávez Alegría

Secretario

Dr. Eduardo Rojas González

Vocal

Dra. Teresa López Lara

Suplente

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca

Suplente

Centro Universitario

Querétaro, Qro.

Fecha: Julio de 2020

RESUMEN

Existe un grave problema de desgaste prematuro en las estructuras de los pavimentos de nuestro país, esto genera que, en su mayoría, estos incumplan con la vida útil de diseño. Por un lado, entre otros factores, el tránsito pesado con exceso de carga es el principal responsable del daño a los pavimentos, por ende y por obvias razones, la capa donde son más evidentes los deterioros es la superficie de rodadura, donde se genera la interacción directa del usuario con el pavimento, comprometiendo el buen estado de las vías, disminuyendo su serviciabilidad, confort y la seguridad del usuario. Por otro lado, el consumo desmedido de botellas de tereftalato de polietileno (más conocido por sus siglas en inglés PET, *polyethylene terephthalate*) en el país va en aumento, generando cada vez más desechos sólidos no degradables que tienen como disposición final un vertedero, en el mejor de los casos. El objetivo de este trabajo es reutilizar dichos residuos sólidos para la fabricación de una geomalla para su uso como refuerzo estructural en la capa de concreto hidráulico de los pavimentos rígidos. Mediante el ensaye de resistencia a la flexión en vigas de concreto reforzadas con la geomalla de PET fabricada se evaluó el desempeño de ambos materiales en conjunto, no solamente les da un uso a tales desechos sólidos no degradables, sino que mejora el módulo de rotura (MR) del firme de concreto hidráulico, incrementando en un 15% la resistencia promedio a la flexión y generando una falla dúctil en el concreto. Con ello, se busca que los pavimentos rígidos logren acercarse al tiempo de vida útil de diseño, resistiendo y distribuyendo de mejor manera los esfuerzos a los que se somete el concreto hidráulico en nuestras carreteras.

Palabras Clave: geomalla, PET, refuerzo, flexión, concreto hidráulico.

SUMMARY

There is a serious problem of premature wear in the structures of the pavements of our country, this generates that, in its majority, these do not accomplish with the service lifetime of design. On the one hand, among other factors, heavy traffic with excess load is the main responsible for damage to pavements, therefore and for obvious reasons, the layer where the deterioration is most evident is the rolling surface, where the direct interaction of the user with the pavement is generated, compromising the good condition of the roads, decreasing their serviceability, comfort and safety for the user. On the other hand, the excessive consumption of polyethylene terephthalate (PET) bottles in the country is increasing, generating more and more non-degradable solid wastes that have as final disposal a landfill, in the best of cases. The objective of this work is the reuse of this solid waste for the manufacture of a geogrid to be used as structural reinforcement in the hydraulic concrete layer of rigid pavements. By testing the flexural strength of concrete beams reinforced with the PET geogrid manufactured, the performance of both materials was evaluated. Not only does it give use to such non-degradable solid waste, but it also improves the modulus of rupture (MOR) of the hydraulic concrete pavement, increasing the average flexural strength by 15% and generating a ductile failure in the concrete. In this way, rigid pavements are brought closer to the design lifetime, resisting and distributing in a better way the efforts to which hydraulic concrete is submitted in our highways.

Keywords: geogrid, PET, reinforcement, flexural behavior, hydraulic concrete.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

A mi padre, quien nunca se ha apartado de mi corazón:

Abraham Miranda Izquierdo

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por ser la institución que, desde el bachillerato, me ha dado la oportunidad de alcanzar las metas en mi vida profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por financiar esta investigación tanto en el país como en el extranjero.

A la Universidad de Medellín, por abrirme las puertas de sus instalaciones para mi estancia académica.

A mis padres, por brindarme la oportunidad del estudio y enseñarme los valores que me tienen hoy aquí, por su amor incondicional.

A mi hermano, Emmanuel, por ser un apoyo inigualable tanto en el estudio como en la vida.

A mis abuelos, Efrén y Gloria, por su apoyo incondicional y por estar presentes en todo momento.

A Dulce, por ser el complemento que todo hombre necesita en esta vida, por lo importante que ha sido durante todo este proceso.

Al Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, por dirigir esta investigación con entusiasmo, dedicación y profesionalismo.

Al Dr. Omar Chávez Alegría, por sus acertados comentarios para el enriquecimiento de esta investigación.

Al Dr. Eduardo Rojas González, por su apoyo y paciencia a lo largo de este proceso.

A la Dra. Teresa López Lara, por sus asesorías y por sus enseñanzas en el aula.

Al Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca, por todos los consejos y observaciones que impulsaron la calidad de esta investigación.

A la Dra. María de la Luz Pérez Rea, por sus enseñanzas y porque sin su ayuda no hubiese sido posible terminar este proyecto en tiempo.

Al Dr. Carlos Eduardo López Bermeo, por hacer posible mi llegada a la Universidad de Medellín para la realización de mi estancia académica y por todo el apoyo durante esta.

Al Dr. Esteban Alberto Correa Bedoya, por su inmejorable apoyo durante el proceso experimental de esta investigación.

Al laboratorio de suelos, concretos y pavimentos de la Universidad de Medellín, por poner todo a disposición y por brindarme la oportunidad de realizar parte de la experimentación de esta investigación.

A los laboratoristas: Andrés, Julián, Julio y Sebastián, por su genuina amistad e inolvidable disposición durante la estancia académica.

A mis compañeros de generación, por hacer muy ameno este proceso y por el apoyo recibido en algún momento de este posgrado.

A mis amigos de profesión y de vida, Alberto Cortés, Artemio Enríquez y Gerardo Ríos, quienes con su presencia y consejos me han dado el impulso para alcanzar las metas.

Finalmente, pero no por ello menos importante, a Dios, quien me permite hacer posible lo que hasta ahora era un sueño.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo	Página
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	3
1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.4 HIPÓTESIS	4
1.5 OBJETIVO.....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 ANTECEDENTES DE LOS CAMINOS EN MÉXICO Y EN EL MUNDO	5
2.2 FUNCIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LAS CAPAS DE TERRACERÍAS 6	
2.3 DEFINICIÓN DE PAVIMENTO	10
2.4 TIPOS DE PAVIMENTOS.....	11
2.4.1 Pavimentos flexibles	12
2.4.2 Pavimentos rígidos.....	12
2.5 DIFERENCIAS ENTRE LOS TIPOS DE PAVIMENTOS	12
2.6 CONCRETO HIDRÁULICO	13

2.7	VENTAJAS DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS	16
2.8	FALLAS EN LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS	18
2.8.1	<i>Facturamiento por fatiga</i>	18
2.8.2	<i>Bombeo, erosión</i>	18
2.9	CARGA DE LOS VEHÍCULOS PESADOS	19
2.10	GEOSINTÉTICOS	23
2.10.1	GEOMALLAS	25
2.11	CONCRETO HIDRÁULICO REFORZADO CON GEOMALLAS CONVENCIONALES	27
2.12	PET	32
2.13	CONCRETO HIDRÁULICO UTILIZANDO PET	34
3.	METODOLOGÍA	37
3.1	MATERIALES	38
3.2	CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS	39
3.2.1	<i>Agregados Gruesos</i>	39
3.2.2	<i>Agregado Fino</i>	45
3.3	DISEÑO DE MEZCLA	49
3.4	CORTE DE TIRAS DE PET	52
3.5	ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES	54
3.6	CORRECCIÓN POR HUMEDAD	55
3.7	MEDICIÓN DEL REVENIMIENTO	56

3.8	ENSAYE DE ESPECÍMENES.....	57
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
4.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.....	59
4.2	DISEÑO DE MEZCLA.....	61
4.3	GEOMALLA.....	62
4.4	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	64
5.	CONCLUSIONES.....	73
6.	REFERENCIAS	75

Dirección General de Bibliotecas UAG

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 2. 1 Porcentaje de vehículos con sobrecargas.	20
Tabla 2. 2 Monitoreo anual de la sobrecarga máxima en vehículos pesados.....	22
Tabla 2.3 Resumen de vigas	28
Tabla 2. 4. Resumen de los resultados de prueba.....	29
Tabla 2.5 Resumen de los resultados de prueba.....	31
Tabla 2. 6 Resumen de resultados a compresión y tensión de la investigación. ...	34
Tabla 2.7 Resultados de resistencia a la flexión y compresión.....	35
Tabla 2. 8 Resistencias a compresión	36
Tabla 3.1 Revenimientos recomendados para varios tipos de construcciones.....	50
Tabla 3. 2. Cantidad de agua para los diferentes tamaños máximos de agregado y el revenimiento.....	51
Tabla 3. 3. Selección de la relación agua/cemento.....	51
Tabla 3. 4. Cantidad de grava en volumen.	52
Tabla 4.1 Resultados de la caracterización del agregado grueso.	59
Tabla 4. 2. Resultados de la caracterización del agregado fino.....	60
Tabla 4. 3. Proporcionamiento para 1 m ³ de concreto hidráulico.....	62
Tabla 4. 4 Propiedades físicas de la geomalla biaxial de PET fabricada.....	63
Tabla 4. 5. Resumen de los resultados de los ensayos a flexión.	65

Tabla 4. 6. Estadístico resistencia a flexión para las diferentes edades de ensaye67

Tabla 4. 7. Parámetros estadísticos de la resistencia a la flexión a 28 días67

Dirección General de Bibliotecas UAQ

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 2.1 Base hidráulica en un pavimento	7
Figura 2.2 Subbase en un pavimento	8
Figura 2.3 Subrasante en un pavimento	9
Figura 2.4 Terraplén en un pavimento	10
Figura 2.5 Secciones típicas de los tipos de pavimentos.....	11
Figura 2.6 Presiones transmitidas de acuerdo con el tipo de pavimento	13
Figura 2.7 Cemento gris marca Argos empleado durante esta investigación.	14
Figura 2.8 Agregados Pétreos para concreto hidráulico.	15
Figura 2.9 Las grandes ventajas del concreto hidráulico	17
Figura 2.10 Fracturamiento por fatiga en pavimento rígido	18
Figura 2.11 Falla por bombeo o erosión en un pavimento rígido	19
Figura 2.12 Monitoreo anual del porcentaje de vehículos pesados sobrecargados.	21
Figura 2.13 Monitoreo anual de peso registrado.....	22
Figura 2. 14 Clasificación de los geosintéticos.	24
Figura 2. 15. Geomalla uniaxial de polietileno de alta densidad.	25
Figura 2.16. Geomalla biaxial de polipropileno.	26
Figura 2. 17. Geomalla triaxial de polipropileno.....	26

Figura 2.18 Comparativa falla y propagación de grietas en losas de concreto hidráulico sin y con refuerzo mediante una geomalla uniaxial.	30
Figura 3.1 Matriz experimental.....	37
Figura 3.2 Ensayo de distribución granulométrica del agregado grueso	40
Figura 3.3 Ensayo de masa volumétrica del agregado grueso	41
Figura 3.4 Ensayo de degradación mediante Desgaste de Los Ángeles.....	42
Figura 3.5 Determinación del contenido de agua del agregado grueso.....	43
Figura 3.6 Ensayo de densidad y absorción del agregado grueso	44
Figura 3.7 Ensayo de distribución Granulométrica de Agregados Finos	45
Figura 3.8 Masa volumétrica compacta del agregado fino.....	47
Figura 3.9 Contenido de agua del agregado fino	48
Figura 3.10 Densidad y absorción del agregado fino.....	49
Figura 3.11 Dispositivo fabricado para el corte de las botellas de PET en tiras. ...	53
Figura 3.12 Colocación de la geomalla de PET fabricada dentro de la viga de concreto.....	54
Figura 3.13 Medición del revenimiento en el concreto.....	56
Figura 3.14 Sección longitudinal típica que muestra la posición de carga y la disposición de la geomalla como refuerzo.	57
Figura 3.15 Ensayo de resistencia a la flexión.....	58
Figura 4. 1. Composición granulométrica del agregado grueso.....	60
Figura 4. 2. Composición granulométrica del agregado fino.....	61

Figura 4. 3. Comparación de la geomalla esperada (arriba) con la geomalla obtenida (abajo). Obsérvese la ondulación y curvatura de las tiras tratando de recuperar la forma cilíndrica de la botella.	63
Figura 4.4. Ensaye de muestra base (izquierda) y una de las reforzadas con geomalla de PET (derecha).	64
Figura 4. 5. Evolución de la resistencia a la flexión (MR) de las cuatro mezclas a edad final de 28 días.....	66
Figura 4. 6. Carta de medias estándar.....	68
Figura 4. 7. Carta de desviaciones estándar	68
Figura 4. 8. Parámetros de la viga de concreto base.....	69
Figura 4. 9. Diagramas de carga, cortante, momento y deflexión de la viga de concreto base.	70
Figura 4. 10. Parámetros de la viga de concreto reforzada con geomalla de PET.	71
Figura 4. 11. Diagramas de carga, cortante, momento y deflexión de la viga de concreto reforzado con geomalla de PET.....	72

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

En México, de acuerdo con datos de la Red Nacional de Caminos, en diciembre de 2015 el país contaba con 328,437.79 km de vías pavimentadas, el 98.5% correspondía a la red asfaltada mientras que tan solo el 1.5% a los pavimentos de concreto hidráulico. A pesar de que Martínez *et al.* (2013) indican que el concreto hidráulico a base de cemento Portland es el material más utilizado para construcciones en el mundo, las vías terrestres de nuestro país tienen a los pavimentos asfálticos como la principal opción para la red carretera. De acuerdo con Huang (2004), la principal diferencia entre ambos tipos de pavimentos es cómo cada uno de ellos transmite las cargas al terreno de desplante o subrasante. En los pavimentos rígidos, la alta rigidez de la losa de concreto le permite mantenerse como una placa y distribuir las cargas sobre un área mayor de la subrasante, transmitiendo presiones muy bajas a las capas inferiores. Por sí misma, la losa proporciona la mayor parte de la capacidad estructural del pavimento rígido. En los pavimentos flexibles, su estructura está construida con materiales más débiles y menos rígidos que el hormigón, más deformables, que transmiten a la subrasante las cargas de manera más concentrada, distribuyendo el total de la carga en menos área de apoyo. Por lo tanto, el pavimento flexible normalmente requiere más capas y mayores espesores para resistir la transmisión de cargas a la subrasante. Diversos investigadores han determinado que: una mayor vida útil, un costo de mantenimiento menor (Parera, 2017), mayor absorción de los esfuerzos, prácticamente indeformables (IMCYC, 2009), un mejor comportamiento ante presencia de agua y periodos de mantenimiento más espaciados (Espinosa y Alarcón, 2012) son algunas ventajas que el pavimento rígido ofrece respecto a los pavimentos flexibles. A pesar de ello, los pavimentos de concreto hidráulico no se encuentran exentos de fallas o deterioros, sobre todo, los causados por el tránsito sobrecargado. Gutiérrez *et al.* (2017) analizaron los vehículos pesados que transitan

por nuestras carreteras en 360 estaciones distribuidas en toda la red carretera nacional. En dicha investigación se puede concluir que prácticamente todos los vehículos pesados que transitan por nuestras carreteras se encuentran sobrecargados. Por ejemplo, durante el 2009 se observa que el 74.4% de los vehículos articulados T3S3 se encontraron circulando con mayor peso de lo permitido.

Baamonde *et al.* (2011) establecen que una de las causas principales del deterioro de los firmes de una carretera son las sobrecargas repetitivas del tránsito. Actualmente se han buscado y propuesto tecnologías alternas que toman en cuenta materiales para mejorar características específicas, como es, la resistencia a la flexión (módulo de rotura), en pavimentos, es el parámetro con el que se diseña y se evalúa el concreto, este posee una baja resistencia a la flexión respecto a la compresión, en un orden de entre 10% a 20% de acuerdo con Rivera (2000). Estos esfuerzos de flexión pueden ser absorbidos por medio del refuerzo estructural, sin embargo, resulta antieconómico empleando acero de refuerzo comúnmente utilizado.

Los geotextiles o geomallas se han usado en la industria de la construcción durante los últimos años, principalmente en las áreas de geotecnia e hidráulica, cumpliendo con funciones en las capas de suelo como: filtro, separación, refuerzo, drenaje, protección e impermeabilización (Baamonde *et al.*, 2011). Para el área de las vías terrestres los geosintéticos se han empleado en la estabilización y mejora entre las capas subyacentes a la superficie de rodamiento (base, subbase y subrasante) por medio de la fricción o entrelazado desarrollado entre las partículas de las diferentes capas y el geosintético, permitiendo mitigar los agrietamientos en la superficie de rodamiento e incluso reducir los espesores de cada capa (Barry, 2010).

Mendoza *et al.* (2011) realizaron pruebas con fibras de polipropileno adicionadas en distintas mezclas con una variación de entre el 0 y 5 kg de fibra por m³ de concreto y con dos diferentes tamaños máximos de agregado grueso, se

observó que la resistencia a compresión no incrementó e incluso tuvo una ligera tendencia a disminuir, para la resistencia a flexión los resultados fueron variables teniendo incrementos hasta del 12% como disminuciones hasta del 21%. A diferencia de las fibras, Meski y Chehab (2014) observaron que, para concretos de resistencia normal, la resistencia a la flexión en vigas se incrementa entre un 12% y 28% con el uso de geomallas comerciales como refuerzo.

El reforzamiento con fibras en concreto hidráulico se ha venido realizado desde los años 60, conociéndose con el nombre de Fiber Reinforced Concrete (FRC), se ha encontrado que las fibras añadidas al concreto mejoran la resistencia a la tracción, a la fatiga, al impacto y a la abrasión; se tiene mayor control con la contracción y con la estabilidad térmica (Zollo, 1997). Investigaciones muestran que la adición de pequeñas cantidades de fibras PET al concreto, aumenta la resistencia y retardan el agrietamiento, esto debido a la geometría que poseen las fibras que ayuda a la unión del concreto en las secciones fisuradas (Foti, 2011).

México es uno de los países que recupera poco más del 50% de los envases Polietilén Tereftalato o mejor conocido, por sus siglas en inglés, como PET (ECOCE, 2011). Independientemente de las disposiciones para el reciclado que establezcan los gobiernos, en la construcción se pueden emplear algunos materiales, como en este caso el PET, para la optimización de las propiedades físicas y mecánicas de dichos materiales.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Existe la necesidad de emplear un refuerzo para mitigar el deterioro en el concreto hidráulico de las vialidades, de acuerdo con lo que expresan Baamonde Roca et al. (2011), con el uso de geosintéticos se tendrá una mejor distribución de esfuerzos sobre el firme de concreto aumentando su capacidad portante y resistencia a la flexión. Además, los resultados de experimentaciones de Meski y Chehab (2014) demuestran que la resistencia a la flexión incrementa hasta un 28% con el uso de geomallas.

Andrady y Neal (2009) señalan que los plásticos son livianos, durables y de bajo costo. En las estadísticas de ECOCE (2011) se observa que en México se recicla poco más del 50% del PET como desecho sólido urbano, lo cual lo hace un material con gran potencial de reciclaje. Las investigaciones de Foti (2011) permiten el uso de PET como fibras para el refuerzo del concreto hidráulico, retardando el agrietamiento e incrementando su resistencia.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En México, existe un grave problema de desgaste en las estructuras de los pavimentos, el tránsito pesado con exceso de carga es común en nuestras vialidades y es uno de los principales responsables del deterioro de los pavimentos.

Por otro lado, el consumo desmedido de botellas de PET en el país va en aumento, generando cada vez más desechos sólidos no degradables.

1.4 HIPÓTESIS

Mediante el uso de una geomalla fabricada de PET como refuerzo a un pavimento de concreto hidráulico se logrará incrementar su resistencia a la flexión hasta en un 15%.

1.5 OBJETIVO

Analizar el comportamiento del firme de concreto en un pavimento rígido al estar reforzado con una geomalla de PET en una capa mediante ensayos de vigas para determinar su resistencia a la flexión.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LOS CAMINOS EN MÉXICO Y EN EL MUNDO

La Real Academia de la lengua española, por sus siglas RAE, define a un camino como una “vía que se construye para transitar”, mientras que la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) lo define como una “vía de comunicación terrestre cuya estructura consta de un terraplén, obras de arte y revestimiento con asfalto o concreto, para tránsito de vehículos”. En términos prácticos, dentro de las vías terrestres, un camino es una vía de comunicación entre dos puntos.

En la antigüedad, de acuerdo con Gómez y Tabanera (2000), los caminos romanos tenían como función principal la vertebración de su territorio mediante los movimientos militares y las relaciones comerciales entre pueblos vecinos haciendo uso de los excelentes caminos pavimentados (Silvio, 2011). Los romanos creían que la comunicación entre pueblos era esencial para conservar su imperio en expansión y, además, porque se creía que una carretera bien construida duraría mucho tiempo con un mínimo mantenimiento (Bofill, 2017), premisa que se mantiene en la actualidad y que se busca alcanzar mediante los reglamentos y normativas existentes. Moreno (2006) define a las ruedas de los carros que transitaron en aquél entonces como auténticas ruedas destrozadoras de pavimentos, debido a su estrecha huella fuertemente herrada.

En Sudamérica, Carrera (1959) establece que los Incas aún sin conocer el vehículo de ruedas construyeron algunas de las primeras carreteras en el mundo, tratándose de una red de caminos que se extendía a lo largo de 18,000 km, desafiando a los obstáculos de la naturaleza accidentada de la región, lo que asombró a algunos exploradores europeos llegando a encontrar estos caminos superiores respecto a las calzadas romanas. De acuerdo con Fournier (2006), en México, al igual que el pueblo inca, los caminos indígenas, predominantemente aztecas y mayas, fueron transitados por viajeros, comerciantes, fieles e incluso

tropas, sin embargo, al no contar con vehículos con ruedas y animales de tiro, la mayoría del transporte en el México antiguo se hacía a pie (Hassig, 2006). No fue hasta la conquista con Hernán Cortés cuando se introdujeron los caballos y mulas para el transporte de mercancías donde se impulsó el trazo de nuevos caminos sobre los ya existentes de los indígenas (Ortiz, 1994).

Moreno (2006) indica que al final del siglo XVIII en Europa revivió el interés por el arte de la construcción de caminos, así lo que conocemos como las primeras carreteras modernas. Investigaciones de Bañón (2000) señalan que en el siglo XIX en Gran Bretaña se perfeccionaron las técnicas de construcción de carreteras, a partir de las mejoras estructurales del ingeniero Thomas Telford quién mediante el análisis de capacidad de carga admisible para las cimentaciones de los caminos permitió que éstos fueran lo suficientemente resistentes como para poder soportar las cargas que transmitían los vehículos que por ellos transitaban durante la primera Guerra Mundial.

Para el siglo XX, luego del desarrollo y popularidad de los automóviles, consecuencia de la producción en serie moderna y el costo accesible de los vehículos, Bañón (2000) concluye en la necesidad de la expansión de las redes de carreteras en todos los países, permitiendo la circulación sin peligro y a altas velocidades, surgiendo entonces las autopistas.

En México, de acuerdo con datos de la Red Nacional de Caminos, en diciembre de 2015 el país contaba con 328,437.79 km de vías pavimentadas, el 98.5% correspondía a la red asfaltada mientras que tan solo el 1.5% a los pavimentos de concreto hidráulico.

2.2 FUNCIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LAS CAPAS DE TERRACERÍAS

La **base hidráulica** es la capa que recibe la mayor parte de los esfuerzos producidos por los vehículos. La carpeta es colocada sobre de ella porque la

capacidad de carga del material friccionante es baja en la superficie por falta de confinamiento. Regularmente esta capa además de la compactación necesita otro tipo de mejoramiento (estabilización) para poder resistir las cargas del tránsito sin deformarse y además de transmitir las en forma adecuada a las capas inferiores. El valor cementante en una base es indispensable para proporcionar una sustentación adecuada a las carpetas asfálticas delgadas. En caso contrario, cuando las bases se construyen con materiales inertes y se comienza a transitar por la carretera, los vehículos provocan deformaciones transversales. En el caso de la granulometría, no es estrictamente necesario que los granos tengan una forma semejante a la que marcan las fronteras de las zonas, siendo de mayor importancia que el material tenga un VRS (valor relativo de soporte) y una plasticidad mínima; además se recomienda no compactar materiales en las bases que tengan una humedad igual o mayor que su límite plástico (ver Figura 2.1).

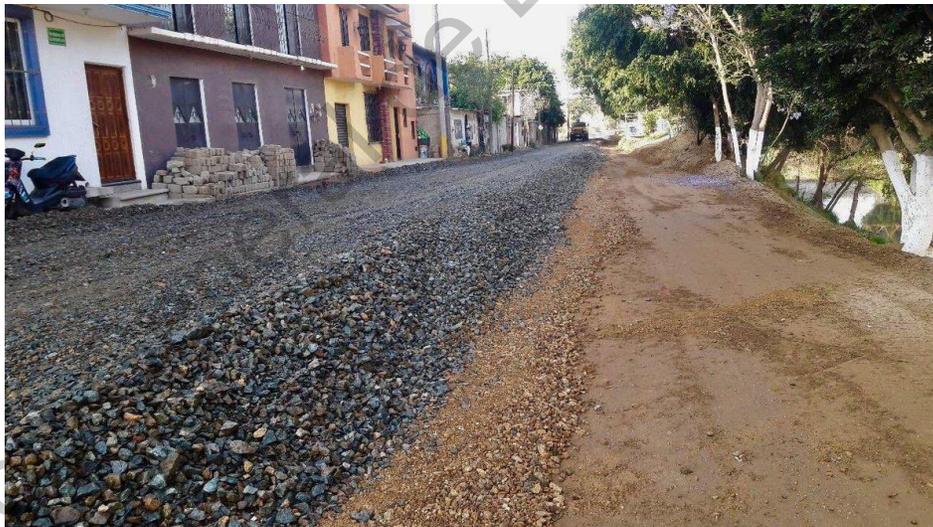


Figura 2.1 Base hidráulica en un pavimento

Fuente: Elaboración propia

Mientras que la **subbase** cumple una cuestión de economía ya que nos ahorra dinero al poder transformar un cierto espesor de la capa de base a un espesor equivalente de material de subbase (no siempre se emplea en el pavimento), impide que el agua de las terracerías ascienda por capilaridad y evitar

que el pavimento sea absorbido por la subrasante. Deberá transmitir en forma adecuada los esfuerzos a las terracerías (ver Figura 2.2).



Figura 2.2 Subbase en un pavimento

Fuente: Elaboración propia

Los principales parámetros para evaluar y controlar la calidad de las capas de base y subbase, de acuerdo con la normativa SCT, son:

- Clasificación granulométrica, contenido de humedad, límites de Atterberg
- Valor cementante, índice de durabilidad, PVSM, GC, equivalente de arena y expansión, adherencia con asfalto.
- Prueba de placa, VRS, y cuerpo de ingenieros.

La función de la **subrasante** es soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación, además de considerarse la cimentación del pavimento. Entre mejor calidad se tenga en esta capa el espesor del pavimento será más reducido y habrá un ahorro en costos sin mermar la calidad. Las características con las que debe cumplir son: f máximo de 3", expansión máxima del 5%, grado de compactación mínimo del 95%; espesor mínimo de 30cm para caminos de bajo tránsito y de 50cm en caminos con un TPDA > de 2000 vehículos. Otra de las

funciones de la subrasante es evitar que el terraplén contamine al pavimento y que sea absorbido por las terracerías (ver Figura 2.3).



Figura 2.3 Subrasante en un pavimento

Fuente: Elaboración propia

Los principales parámetros para evaluar y controlar la calidad de la capa de subrasante, de acuerdo con la normativa SCT, son:

- Clasificación granulométrica, contenido de humedad, límites de Atterberg.
- Peso volumétrico seco máximo y grado de compactación.
- VRS, cuerpo de ingenieros de los EU y prueba de placa.

La finalidad del cuerpo del **terraplén** es proporcionar la altura necesaria para cumplir con el proyecto, deberá resistir las cargas de las capas superiores y distribuirlas adecuadamente en el terreno natural. Por normatividad no se acepta material del tipo MH, OH, y CH cuando su límite líquido sea mayor del 80%, deberá tener un VRS mínimo de 5%. Si está compuesto de rocas, se recomienda formar capas del espesor del tamaño máximo y se pasará un tractor de oruga en tres ocasiones por cada lugar con un movimiento de zig zag que se conoce como bandeo, el grado de compactación mínima será del 90% y si es necesario realizar

modelos en barrancas donde no es fácil el empleo del equipo, se permite que el material se coloque a volteo hasta una altura donde ya pueda operar la maquinaria. Se recomienda el compactador pata de cabra con equipo de vibrado y un peso aproximado de 20 a 30 toneladas (ver Figura 2.4).



Figura 2.4 Terraplén en un pavimento

Fuente: Elaboración propia

Los principales parámetros para evaluar y controlar la calidad de la capa de terraplén, de acuerdo con la normativa SCT, son:

- Clasificación granulométrica, contenido de humedad, límites de Atterberg
- Peso volumétrico seco máximo y grado de compactación

2.3 DEFINICIÓN DE PAVIMENTO

Un pavimento es una estructura de las vías de comunicación terrestres, formada por una o más capas de materiales elaborados o no, colocados sobre el terreno acondicionado, que tiene como función el permitir el tránsito de vehículos:

- Con seguridad
- Con comodidad

- Con el costo óptimo de operación
- Con superficie uniforme
- Con superficie impermeable
- Con color y textura adecuados
- Resistente a la repetición de cargas
- Resistente a las acciones del medio ambiente
- Que disipe los esfuerzos adecuadamente

Deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, siendo de menor calidad los que se colocan en las terracerías además de que son los materiales que más comúnmente se encuentran en la naturaleza, y por consecuencia resultan los más económicos.

2.4 TIPOS DE PAVIMENTOS

En nuestro medio existen dos principales tipos de pavimento, por un lado, se encuentran los pavimentos flexibles y por otro lado están los pavimentos rígidos tal y como lo indica la Figura 2.5.



Figura 2.5 Secciones típicas de los tipos de pavimentos

Fuente: Elaboración propia a partir del Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las Carreteras de la República Mexicana (SCT).

2.4.1 Pavimentos flexibles

Los **pavimentos flexibles** o asfálticos, en general, están constituidos por una capa delgada de mezcla asfáltica construida sobre una capa de base y una capa de subbase las cuales, usualmente, son de material granular. Estas capas descansan en una capa de suelo compactado, llamada subrasante.

La capa de rodadura de un pavimento flexible puede construirse con un hormigón bituminoso, mezclas de arena y betún, o mediante tratamientos superficiales con riegos bituminosos. Está sometida a los esfuerzos máximos y condiciones más severas impuestas por el clima y el tráfico. La capa de base se compone generalmente de áridos, que han sido tratados o no con cemento portland, cal, asfalto u otros agentes estabilizantes. Esta capa tiene como principal función, la de soportar las cargas aplicadas y distribuir estas cargas a la subbase o al terreno. La capa de subbase se compone de materiales menor calidad y costo que los empleados en la capa de base. Se componen de materiales estabilizados o no, o de terreno estabilizado. Las subbases transmiten cargas al terreno y en algunos casos pueden actuar de colaborador del drenaje de las aguas del subsuelo y para prevenir la acción destructiva de las heladas.

2.4.2 Pavimentos rígidos

Los **pavimentos rígidos** se integran por una capa (losa) de concreto de cemento portland que se apoya en una capa de base, constituida por grava; esta capa descansa en una capa de suelo compactado, llamada subrasante. La resistencia estructural depende principalmente de la losa de concreto.

2.5 DIFERENCIAS ENTRE LOS TIPOS DE PAVIMENTOS

Su principal diferencia es cómo cada uno de ellos transmite las cargas a la subrasante. La alta rigidez de la losa de concreto le permite mantenerse como una placa y distribuir las cargas sobre un área mayor de la subrasante, transmitiendo presiones muy bajas a las capas inferiores. Por sí misma, la losa proporciona la

mayor parte de la capacidad estructural del pavimento rígido. Pavimento flexible, está construido con materiales débiles y menos rígidos (que el hormigón), más deformables, que transmiten a la subrasante las cargas de manera más concentrada, distribuyendo el total de la carga en menos área de apoyo. Por lo tanto, el pavimento flexible normalmente requiere más capas y mayores espesores para resistir la transmisión de cargas a la subrasante. La rigidez del concreto distribuye la carga sobre un espacio más amplio y mantiene al mínimo la presión en la subrasante (ver Figura 2.6).

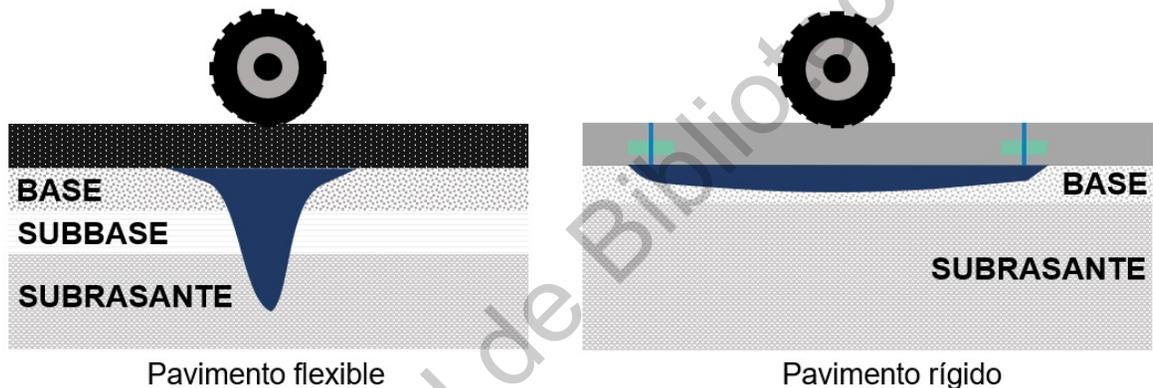


Figura 2.6 Presiones transmitidas de acuerdo con el tipo de pavimento
Fuente: Modificada a partir de página www.cement.ca

2.6 CONCRETO HIDRÁULICO

Una vez identificados ambos tipos de pavimentos, esta investigación se centrará en los pavimentos rígidos de concreto hidráulico y su refuerzo en el firme de concreto. De acuerdo con la SCT (2006), las carpetas de concreto hidráulico son las que se construyen mediante la colocación de una mezcla de agregados pétreos, cemento Pórtland y agua, para proporcionar al usuario una superficie de rodadura uniforme, bien drenada, resistente al derrapamiento, cómoda y segura. Tienen además la función estructural de soportar y distribuir la carga de los vehículos hacia las capas inferiores del pavimento.

El **Cemento Pórtland** (Figura 2.7) es un conglomerante hidráulico que al ser hidratado se solidifica y endurece. Se obtiene mediante un proceso industrial, pulverizado a un grado de finura determinado, es una mezcla fría de arcilla y materiales calcáreos, previamente a cocción, que se denomina *Clinker Pórtland*, al cual se le adiciona sulfato de calcio, yeso o semihidrato para regular el tiempo de fraguado (N-CMT-2-02-001/02).



Figura 2.7 Cemento gris marca Argos empleado durante esta investigación.

Fuente: Elaboración propia.

Los **agregados pétreos**, contribuyen a la estabilidad mecánica, soportan la carga del tráfico y al mismo tiempo transmiten la carga a la base hidráulica. Estos materiales deben ser de calidad uniforme, triturados a tamaño según sea necesario, compuestas de fragmentos de roca sólida, con o sin arena. Todo material pétreo debe estar libre de arcilla, materia orgánica y otras sustancias que afecten la estabilidad del concreto hidráulico y a su vez del pavimento rígido. Los tipos de agregados para el concreto hidráulico se clasifican en agregado fino, agregado grueso, fragmento de roca y agregado ligero.

El **agregado fino** (Figura 2.8), es la arena natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, con partículas de tamaño comprendido entre 75 micrómetros (malla No. 200) y 4.75 milímetros (malla No.4), pudiendo contener finos de menor

tamaño, dentro de las proporciones establecidas en la Norma N.CMT.2.02.002.02 (*CMT. Características de los materiales*).

El **agregado grueso** (Figura 2.8), puede ser grava natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, escorias de altos hornos enfriadas en aire o una combinación de dichos materiales, con partículas de tamaño máximo, generalmente comprendido entre 19 milímetros ($3/4$ " y 75 (3") milímetros, pudiendo contener fragmentos de roca y arena, dentro de las proporciones establecidas en la Norma N.CMT.2.02.002.02 (*CMT. Características de los materiales*). El **fragmento de roca**, que son los agregados con tamaño mayor de 75 mm (3") y una máxima de 30 kilogramos, como los boleos y la piedra de braza, entre otros. Finalmente, los **agregados ligeros**, son los agregados finos o gruesos, que, por su baja densidad, se utilizan en la fabricación de concreto estructural ligero, de baja masa volumétrica y resistencia limitada a la compresión, en ellos, predominan materiales inorgánicos de estructura celular, preparados por expansión, calcinación o fusión incipiente de productos tales como escoria de alto horno, arcilla común, diatomitas, cenizas volantes, lutitas y pizarras.



Figura 2.8 Agregados Pétreos para concreto hidráulico.
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con su función la norma M.MMP.2.02.005/04 (CMT. Características de los materiales) los clasifica:

Concreto hidráulico clase 1: es el concreto cuya masa volumétrica en estado fresco está comprendida entre 2, 200 y 2, 400 kg/m³, que, al alcanzar su fraguado final, tendrá una resistencia a la compresión ($f'c$) de 250 kg/cm² o mayor.

Concreto hidráulico clase 2: es el concreto cuya masa volumétrica en estado fresco está comprendida entre 1, 800 y 2, 200 kg/m³, que, al alcanzar su fraguado final, tendrá una resistencia a la compresión ($f'c$) menor a 250 kg/cm².

2.7 VENTAJAS DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

Algunas de las ventajas de los pavimentos rígidos respecto a los pavimentos flexibles, según Ochoa (2014) y Celis (2011) son:

Durabilidad: Las carreteras de concreto pueden ser diseñadas para 50 años o más, y duran alrededor de tres veces más que las de asfalto, antes de requerir trabajos importantes de rehabilitación.

Bajo costo de mantenimiento: Al requerir mínimos trabajos de conservación y en periodos mayores, se recupera la inversión inicial en el corto y mediano plazo. Los ahorros en mantenimiento son superiores al 90%.

Seguridad: El concreto hidráulico colocado bajo las especificaciones y con los equipos adecuados permite lograr una superficie de rodamiento con alto grado de planicidad y dada su rigidez esta superficie permanece plana durante toda su vida útil. Otro fenómeno que se evita con la utilización del concreto hidráulico es la formación de severas deformaciones en las zonas de arranque y de frenado que hacen a los pavimentos ser más inseguros y maltratan fuertemente los vehículos. Finalmente, por el color claro del pavimento de concreto hidráulico se tiene una mejor visibilidad en caso de transitar de noche o en la oscuridad de días nublados.

Altos índices de servicio: Siguiendo las recomendaciones de construcción adecuadas se puede proveer al pavimento de una superficie altamente antiderrapante. La utilización de nuevas tecnologías de materiales y procesos constructivos permite mantener estos índices de servicio, evitando la presencia de escalonamientos en las losas sobre todo en tramos donde el tráfico es significativamente pesado.

Mejor distribución de esfuerzos: Dada la rigidez de la losa los esfuerzos que se transmiten a las capas inferiores del pavimento se distribuyen de una manera prácticamente uniforme, cosa contraria a lo que sucede con los pavimentos flexibles en donde las cargas vehiculares concentran un gran porcentaje de su esfuerzo exactamente debajo del punto de aplicación de la carga y que se van disminuyendo conforme se alejan de la misma, lo que permite una mejor condición y menor deterioro de los suelos de soporte.

De acuerdo con Lugo (2003), en países desarrollados el uso de concreto hidráulico como pavimento en las carreteras es, además de más económico a largo plazo con un excelente desempeño, una medida de protección ambiental al utilizar los recursos petroleros (asfalto) de manera más racional.

En una encuesta realizada por *Concrete Roads*, de Canadá, el concreto resultó un material superior que el asfalto para carreteras por las siguientes características:

- Provee una mejor visibilidad.
- Es amigable con el medio ambiente.
- Seguro en la lluvia.
- Durante la construcción de una carretera de concreto se crean más fuentes de trabajo.
- Incide en un mejor rendimiento del combustible.
- Ofrece mayor duración.
- Requiere de poco mantenimiento.
- Su uso en carreteras da por resultado una superficie suave de manejo a lo largo de su vida útil.

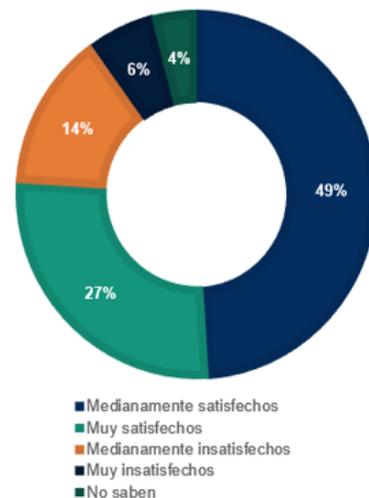


Figura 2.9 Las grandes ventajas del concreto hidráulico
Fuente: Modificada a partir de la realizada por www.cement.ca

2.8 FALLAS EN LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

Las principales fallas en pavimentos rígidos, de acuerdo con Garnica *et al.* (2002), son:

2.8.1 Facturamiento por fatiga

Ocurre en áreas sujetas a cargas de tráfico repetidas (pasos de las ruedas). Pueden ser una serie de grietas interconectadas en las primeras etapas de desarrollo (ver Figura 2.10). Se convierte en piezas de muchos lados, afiladas, generalmente menos de 0,3 m en el lado más largo, característicamente con un patrón de piel de cocodrilo en etapas posteriores. El fracturamiento por fatiga es causado probablemente por los esfuerzos que se inducen en el borde y en la mitad de la losa. El número permisible de repeticiones de carga para causar el fracturamiento por fatiga depende de la relación de esfuerzos entre el esfuerzo a la flexo-tensión y el módulo de ruptura del concreto.

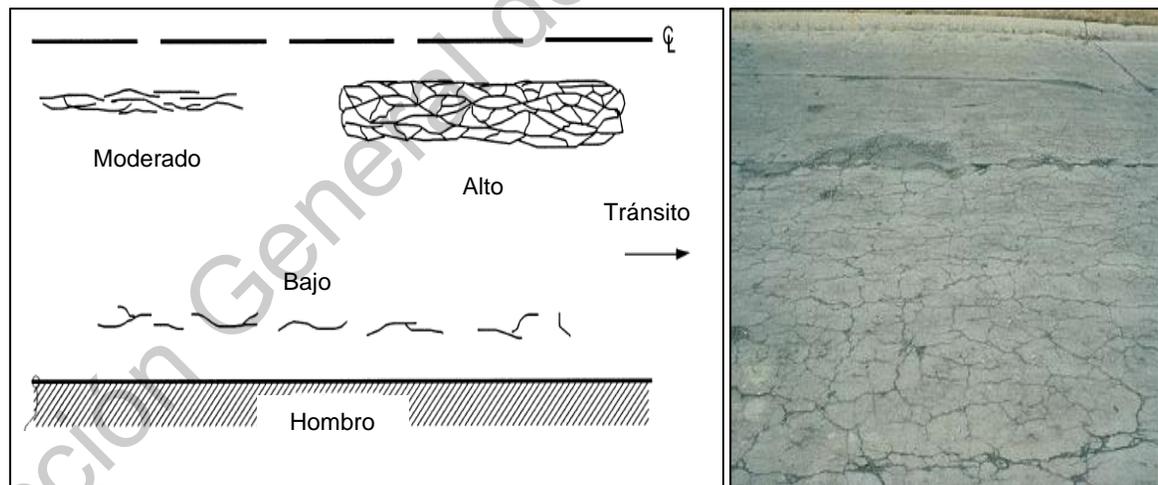


Figura 2.10 Fracturamiento por fatiga en pavimento rígido

Fuente: Modificada a partir de Federal Highway Administration (2014).

2.8.2 Bombeo, erosión

Es la expulsión de agua mezclada con suelos finos, a través de las juntas, grietas y borde externo del pavimento al pasar un vehículo, especialmente pesado. En algunos casos se forma un pequeño poso o bache en la berma, al borde del

pavimento, en otras situaciones después de pasado algún tiempo de determinada precipitación, el fenómeno queda de manifiesto por una deposición de suelos finos sobre la superficie y alrededor del lugar por donde fueron expulsados. Cuando existe agua entre el pavimento y la base o ésta se encuentra cercana a la saturación, el tránsito, en especial los vehículos pesados, produce un efecto de succión y luego bombeo que erosiona el material fino de la base. El fenómeno es especialmente activo cuando la transmisión de cargas entre losas es inadecuada.

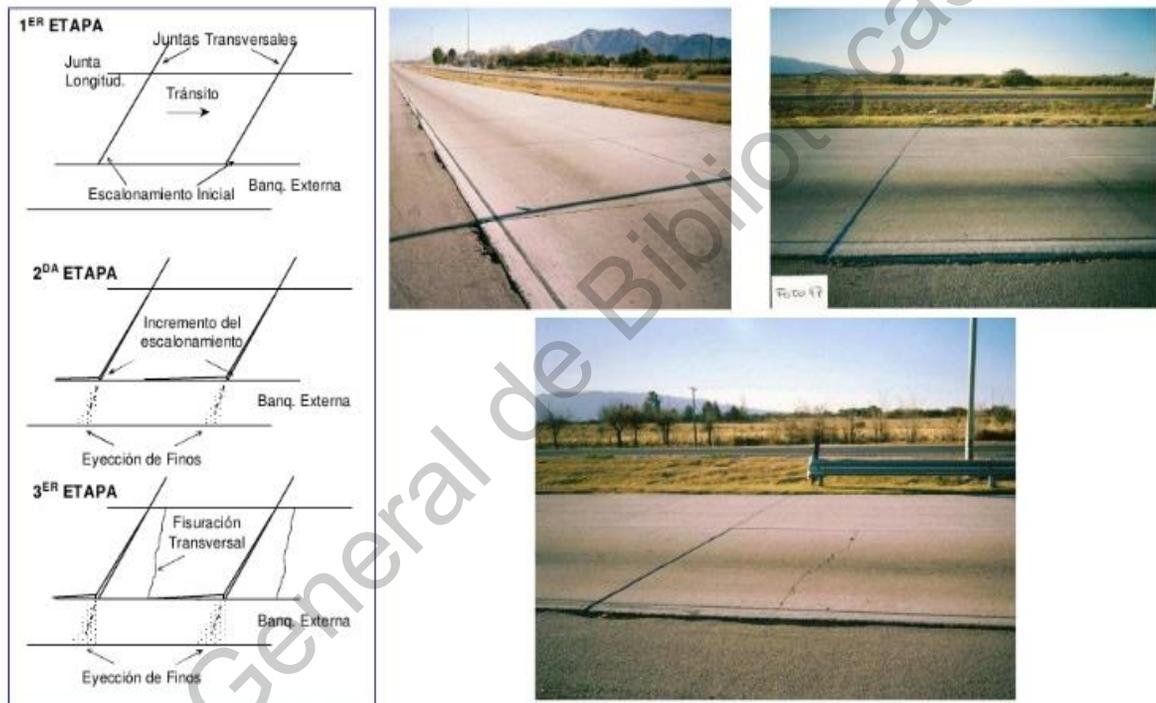


Figura 2.11 Falla por bombeo o erosión en un pavimento rígido
Fuente: Calo (2008).

2.9 CARGA DE LOS VEHÍCULOS PESADOS

Rezwana y Hiller (2019) analizaron las configuraciones de vehículos pesados que transitan por las carreteras de Estados Unidos de América y determinaron que éstos además de ser los principales causantes del deterioro de los pavimentos, el número de ejes, la presión de inflado y el espesor de la losa, para el caso de los

pavimentos rígidos, son los factores que más influyen a la hora de transmitir los esfuerzos a la superficie de rodamiento y de ésta a las capas subyacentes.

En México, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en 1991 inició un estudio denominado “Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional”, el cual buscaba conocer, entre otras cosas, las condiciones de peso y las dimensiones de los diferentes tipos de vehículos de carga que circulan en las carreteras nacionales.

Gutiérrez et al. (2017) analizaron los vehículos que transitan por nuestras carreteras en 360 estaciones distribuidas en toda la red carretera nacional, el porcentaje de vehículos sobrecargados respecto al total de vehículos de carga observados se presenta en la Tabla 2.1.

Tabla 2. 1 Porcentaje de vehículos con sobrecargas.

Vehículo	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
C2	2.6	3.9	4.3	6.5	4.2	5.2	7.0	5.1	7.3	8.7	5.0	2.8	4.8	6.0	3.3
C3	4.3	9.1	8.8	10.6	4.7	4.8	8.2	27.9	27.9	20.2	27.8	19.7	20.9	22.6	9.5
T3S2	26.5	21.8	32.1	8.2	8.0	8.8	9.6	27.5	22.9	23.5	31.3	26.3	27.0	27.4	14.9
T3S3	44.9	40.3	37.0	22.1	14.3	16.6	28.6	74.4	63.4	62.1	62.7	60.9	67.0	59.4	22.2
T3S2R4	50.1	50.4	67.8	37.3	16.3	24.0	34.1	54.0	48.3	61.1	61.2	50.3	57.2	50.2	50.8
% Anual	20.3	19.0	16.2	12.2	8.0	10.6	13.2	31.6	26.8	28.1	22.6	25.7	31.5	29.4	20.2

Fuente: Gutiérrez et al. (2017).

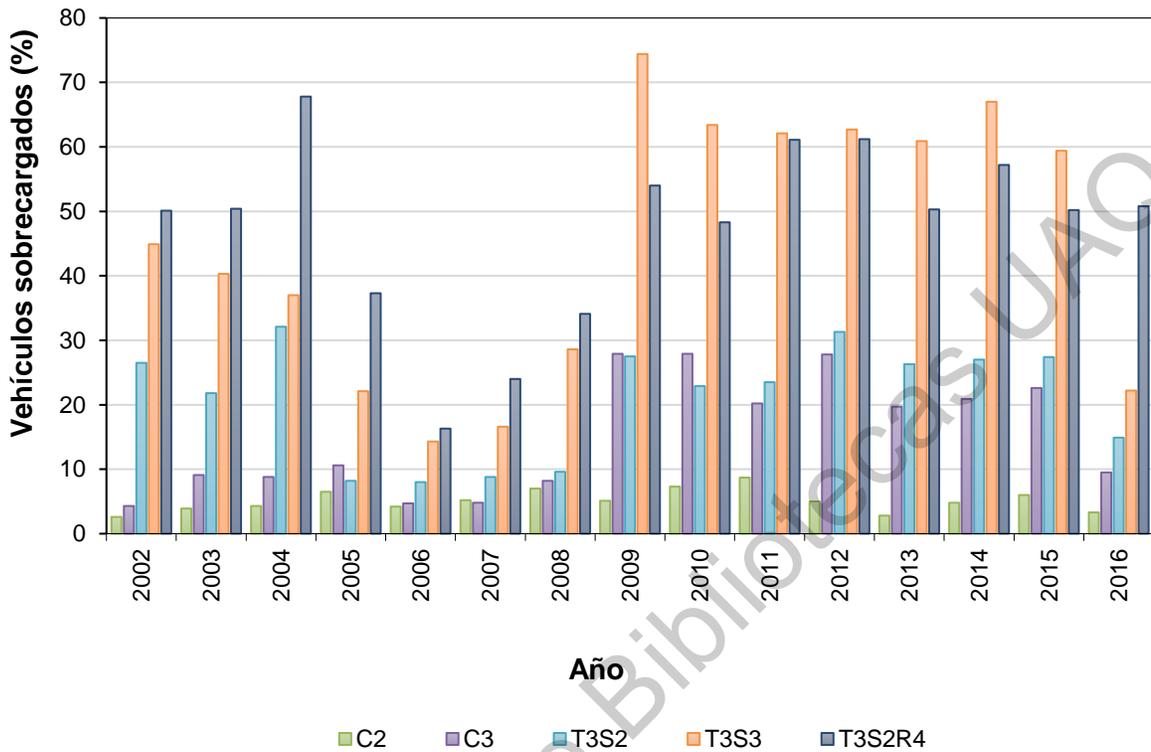


Figura 2.12 Monitoreo anual del porcentaje de vehículos pesados sobrecargados.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos reportados por Gutiérrez et al. (2017).

En la Tabla 2. 2 se aprecia que los vehículos pesados han llegado a sobrepasar hasta 4.7 veces más del peso máximo reglamentado en la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017 vigente, sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal, como es el caso de los vehículos articulados T3S2 en 2016. Las secciones de pavimento rígido en nuestro país están diseñadas a partir de las cargas máximas permitidas por lo que nunca alcanzarán su tiempo de vida útil con estas condiciones.

Tabla 2. 2 Monitoreo anual de la sobrecarga máxima en vehículos pesados.

Vehículo	Peso máximo reglamentado, 2017 (t)	Peso máximo registrado (t)														Porcentaje de exceso de carga	
		2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015		2016
C2	19.0	22.5	22.5	20.2	23.8	22.8	26.0	23.9	24.4	24.5	28.3	25.4	24.5	25.7	25.7	85.3	348.9%
C3	27.5	33.0	37.1	34.9	48.4	35.8	40.0	32.4	42.3	37.1	39.3	37.4	36.4	40.0	39.1	90.8	230.2%
T3S2	46.5	71.2	62.5	61.7	116.0	66.2	89.1	64.7	71.3	78.8	75.5	71.2	75.5	89.1	70.7	265.4	470.8%
T3S3	54.0	73.9	72.7	70.8	118.0	71.2	89.2	71.6	91.0	71.8	91.0	83.3	83.3	83.3	72.0	255.1	372.4%
T3S2R4	66.5	99.5	99.2	99.5	125.6	94.5	99.6	98.3	98.3	96.8	98.3	98.3	98.3	98.3	98.3	180.0	170.7%

Fuente: Modificada a partir de la realizada por Gutiérrez *et al.* (2017).

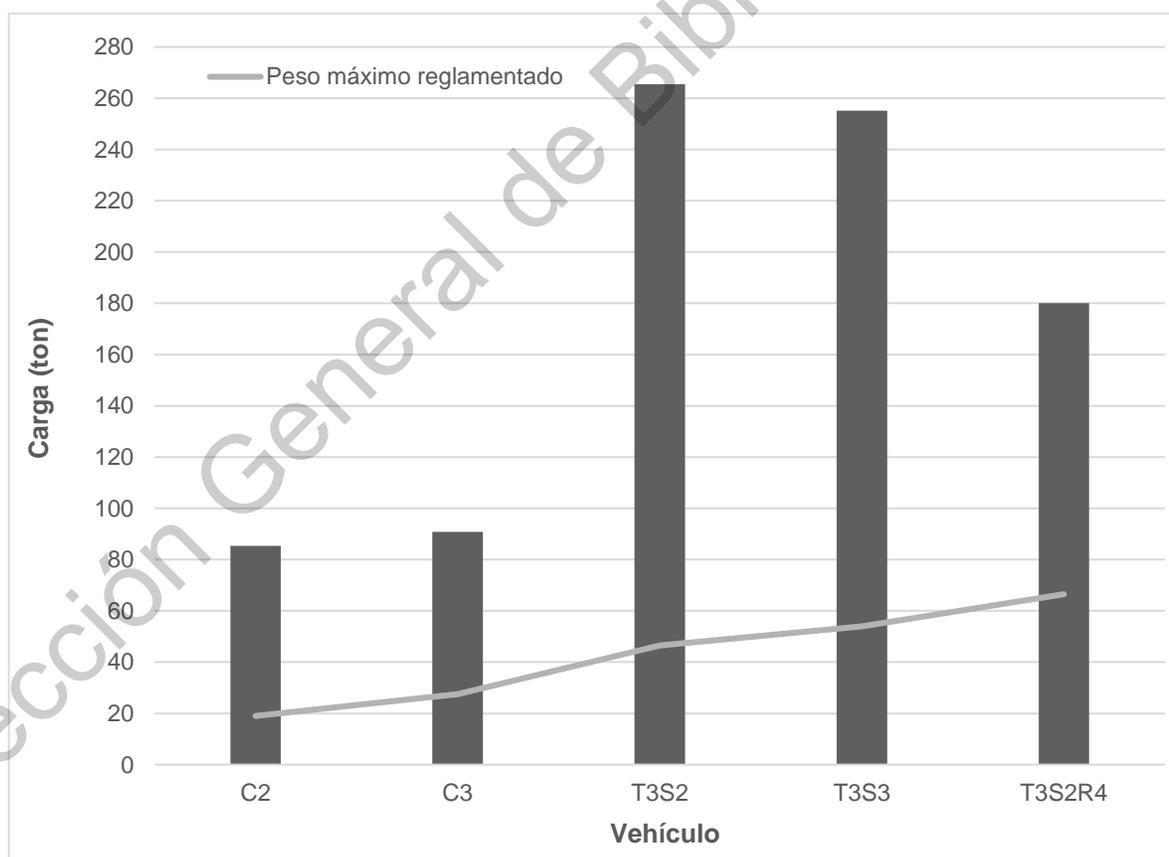


Figura 2.13 Monitoreo anual de peso registrado.

Fuente: Elaboración propia a partir de Gutiérrez *et al.* (2017).

De los resultados durante los 26 años de este estudio se puede concluir que, entre otras cosas, los vehículos más usados para el movimiento de mercancías han sido camiones unitarios C2 y C3, los tractocamiones sencillos T3S2 y T3S3 y los tractores doblemente articulados T3S2R4, y que la participación de estos últimos ha aumentado con el paso de los años. Teniendo en cuenta los datos que se presentan en este estudio, se puede observar un sobreesfuerzo de gran magnitud a los pavimentos de nuestras carreteras, siendo una de las principales causas de su deterioro. La aplicación de las sobrecargas es una afectación que tiene como consecuencia las deformaciones de los pavimentos, en donde, la aplicación de la carga se ve distribuida por sus diferentes capas.

2.10 GEOSINTÉTICOS

Geosintéticos es el término utilizado que se le da a los materiales que en muchos casos han resuelto diversos problemas en la ingeniería civil. Su origen etimológico proviene del griego “geos” que significa tierra y del griego “synthetikós” que se refiere a la composición de un todo por la unión de sus partes, relativo a la formación o estructuración. La unión de estas dos palabras define el significado de los geosintéticos, es decir, materiales obtenidos por procedimientos industriales en forma de láminas, películas, mallas, redes, celdas, textiles, etc., con fines de filtración, drenaje, separación, refuerzo y estabilización (Rawal et al., 2009), así como de impermeabilización y contención (Kelechi y Okeke, 2018), además de absorción, unión, antideslizamiento y de superficie (Giroud, 1984) como parte integrante de estructuras de ingeniería civil de tierra, roca u otros materiales de construcción.

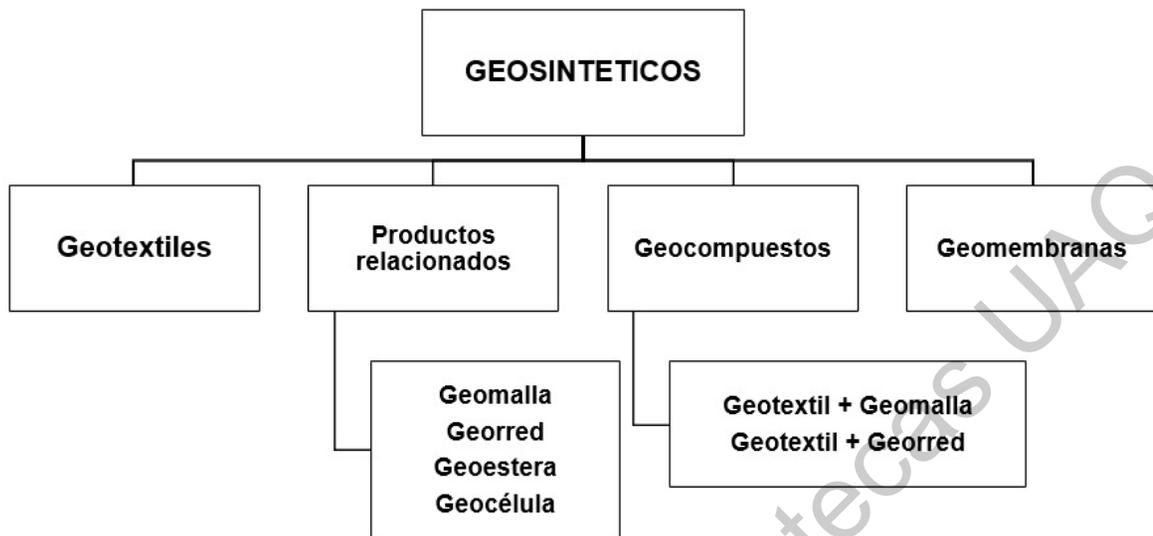


Figura 2. 14 Clasificación de los geosintéticos.

Fuente: Modificada a partir de lo presentado por Ballester et al. (2000)

De acuerdo con la clasificación propuesta por Ballester et al. (2000) los geosintéticos se pueden dividir en cuatro grandes grupos: geotextiles, productos relacionados con geotextiles, geocompuestos y geomembranas. Los productos relacionados con los geotextiles se caracterizan por funcionar de forma análoga a los geotextiles y por cierta resistencia a tracción, además, están fabricados mediante entrelazado y ligadura de fibras y filamentos. Los más usados son los siguientes: geomallas, georredes, geoesteras y geocélulas. Por otro lado, se llama geocompuesto al producto en el que al menos uno de sus componentes es un geotextil o un producto relacionado y se emplea, como los geotextiles, comúnmente en aplicaciones geotécnicas en ingeniería civil. El más utilizado es el “geotextil + geomalla”, sobre todo en sistemas de drenaje. Las geomembranas, por su parte, son materiales planos de naturaleza polimérica que se diferencian de los geotextiles en su capacidad impermeable. También se utilizan en aplicaciones geotécnicas de ingeniería civil, generalmente en túneles. Para los fines de esta investigación, únicamente se hablará de las geomallas debido a que, por sus características, el geosintético fabricado en este proyecto se puede clasificar como una geomalla.

2.10.1 GEOMALLAS

De acuerdo con diversos distribuidores y fabricantes de geomallas en México, se pueden definir como “geosintéticos constituidos por un conjunto de costillas conectadas y con aberturas, que permiten la trabazón del suelo, cuya función principal es la de refuerzo interno, mejoramiento de suelos y estabilización de subrasantes” (TDM México) y “son materiales geosintéticos que consisten en una superficie uniforme, presentadas en forma de rectángulo o en forma de tiras y unidas por un punto llamado nodo” (Texdelta). El mecanismo fundamental de trabajo de las geomallas es por fricción, debido a la interacción directa con los materiales que la rodean y el efecto de confinamiento sobre las partículas que se alojan en las aberturas de la geomalla. Los materiales más comunes para la fabricación de las geomallas en el mercado son el poliéster, polipropileno y polietileno de alta densidad. De acuerdo con GEOACE (2019), estas se clasifican en tres principales grupos:

- Uniaxiales (monorientada): está diseñada con el propósito específico de soportar la tensión en una sola dirección. Se forman estirando las costillas en una dirección de longitud y su resistencia a la tracción se genera en el sentido longitudinal de las costillas.



Figura 2. 15. Geomalla uniaxial de polietileno de alta densidad.
Fuente: MacGrid EG uniaxial.

- Biaxiales (biorientada): está diseñadas para tener un equilibrio igual de resistencia a la tracción tanto en el sentido longitudinal como en las direcciones transversales. Esto le da a la geomalla la capacidad de distribuir cargas en un área más amplia de lo habitual.



Figura 2.16. Geomalla biaxial de polipropileno.

Fuente: BXP 12.

- Triaxiales (multiorientada): orientada en múltiples direcciones equiláteras para formar aberturas triangulares. Esto crea una malla más eficiente que ofrece una transferencia óptima de tensión en servicio desde el agregado a la geomalla.

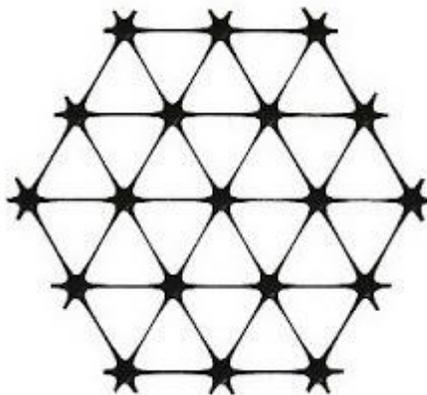


Figura 2. 17. Geomalla triaxial de polipropileno.

Fuente: Tensar TriAx.

La función principal de una geomalla es la del refuerzo, esto se logra mediante una distribución de cargas, resultado de la interacción o fricción a la que es sometido el geosintético.

2.11 CONCRETO HIDRÁULICO REFORZADO CON GEOMALLAS CONVENCIONALES

Meski y Chehab (2014) investigaron la aportación a la resistencia a la flexión de geomallas uniaxiales de Polietileno de Alta Densidad (por sus siglas en inglés, PPEAD), así como biaxiales y triaxiales de polipropileno, en vigas de concreto. Por un lado, distinguen a la geomalla triaxial por sus aperturas triangulares con nervaduras orientadas en tres direcciones equiláteras. Por otro lado, las geomallas uniaxiales de PEAD exhiben una alta resistencia a la tensión en sus nervaduras unidireccionales, y finalmente, las biaxiales tienen una resistencia a la tensión en dos direcciones. Su investigación consistió en la prueba de 21 vigas simplemente apoyadas para hacer una comparativa entre las tres tipos de geomallas y su comportamiento en ensayos de flexión. (ver Tabla 2.3).

Las secciones transversales de las vigas constaron de dimensiones de 15 cm de ancho por 15 cm de espesor y una longitud de 53 cm, la cual constaba de una ranura triangular de 8 mm de ancho por 4.5 mm de profundidad sobre la parte inferior del centro de la superficie induciendo la falla de flexión cerca de la mitad del ancho. Utilizaron dos mezclas de Cemento a la que llamaron resistencia normal de 35 MPa y resistencia alta de 45 MPa.

Tabla 2.3 Resumen de vigas

Resistencia normal	Resistencia alta	Colocación de Geomalla
3 sin refuerzo (control)	3 sin refuerzo (control)	---
3 con una capa de geomalla uniaxial	---	5 cm por encima de la parte inferior de la viga
3 con una capa de geomalla biaxial	3 con una capa de geomalla biaxial	5 cm por encima de la parte inferior de la viga
3 con una capa de geomalla triaxial	3 con una capa de geomalla triaxial	5 cm por encima de la parte inferior de la viga

Fuente: Elaboración propia a partir de Meski y Chehab (2014)

Las 3 geomallas utilizadas fueron clasificadas como rígidas, de las cuales, la geomalla uniaxial fue de polietileno de alta densidad, mientras que los otros dos tipos fueron de polipropileno, teniendo como resultado, en concretos de resistencia normal, un incremento de hasta el 27.6% para los elementos con refuerzo de geomalla triaxial respecto al espécimen sin refuerzo, los resultados para las vigas con refuerzo uniaxial y biaxial fueron satisfactorios de igual manera, incrementando en un 20.4% y 12.3% respectivamente. Para concretos de alta resistencia los resultados fueron más conservadores, incrementando únicamente un 0.6% y 6.1% con refuerzos de geomallas biaxial y triaxial respectivamente. La Tabla 2. 4 muestra los resultados de las resistencias a la flexión para cada tipo de resistencia y geomalla utilizada.

Tabla 2. 4. Resumen de los resultados de prueba.

Resistencia del concreto	Tipo de espécimen	Resistencia a la flexión (kPa)	Incremento de la resistencia
Resistencia normal	Control	2,990	-
	Uniaxial	3,600	20.4%
	Biaxial	3,358	12.3%
	Triaxial	3,816	27.6%
Alta resistencia	Control	5,072	-
	Biaxial	5,100	0.6%
	Triaxial	5,379	6.1%

Fuente: Modificada a partir de la realizada por Meski y Chehab (2014).

Itani et al. (2016) realizaron experimentos con geomallas uniaxiales de PEAD como refuerzo dentro de losas de concreto hidráulico con la finalidad de analizar su comportamiento, así como de reducir las grietas por temperatura y las grietas causadas por la carga del tránsito para el firme de concreto en pavimentos rígidos, durante los ensayos en laboratorio se pudo observar que los elementos reforzados presentaron una grieta en la parte inferior de la losa, donde se producen los mayores esfuerzos por tensión, mas esta no se extendió y permitió mayores deformaciones respecto a la losa sin refuerzo, misma que falló por completo partiéndose por la mitad (ver Figura 2.18).

Rakendu y Anagha (2017) experimentaron con vigas reforzadas con geomallas convencionales variando el número de capas y la resistencia del concreto, teniendo como objetivo evaluar la viabilidad y beneficios de las geomallas como refuerzo en el concreto, para ello, se basó en un estudio preliminar de los materiales, procediendo a hacer tres diferentes diseños de mezcla reforzando con geomalla a vigas en 1, 3 y 5 capas. No se especifica el tipo de geomalla utilizada.

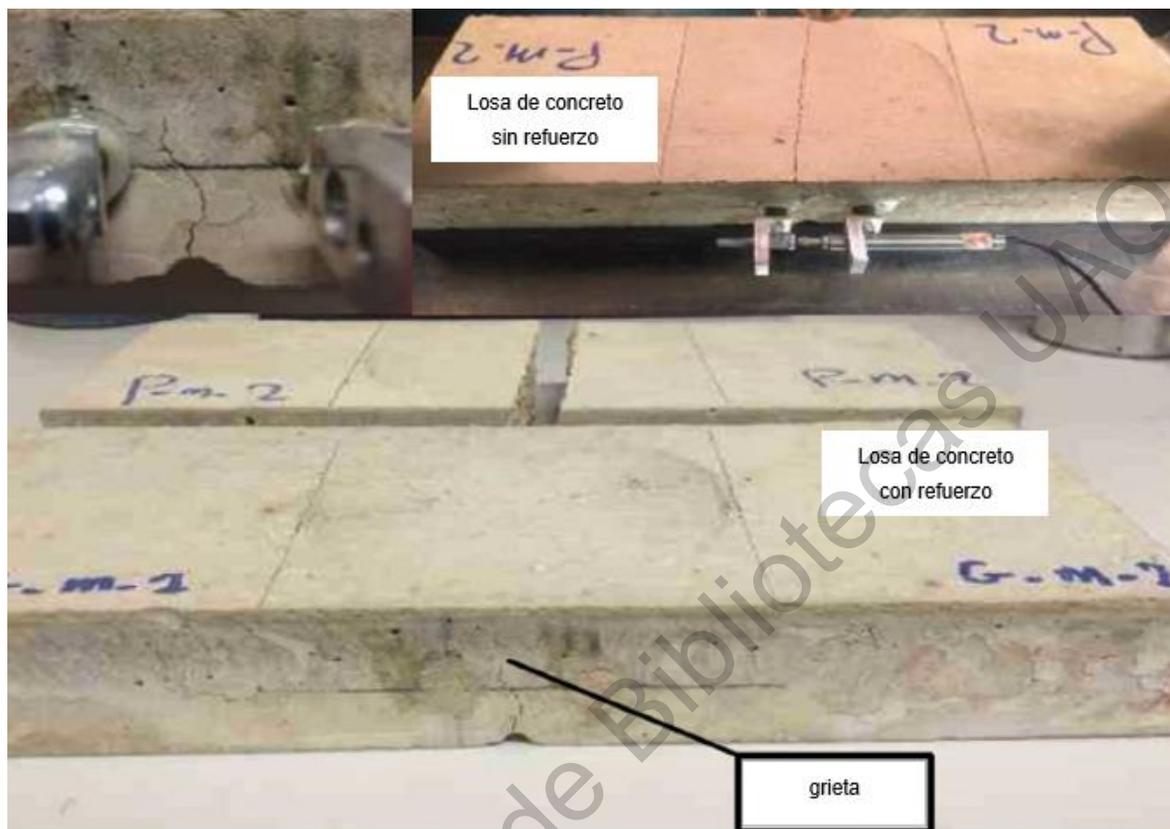


Figura 2.18 Comparativa falla y propagación de grietas en losas de concreto hidráulico sin y con refuerzo mediante una geomalla uniaxial.

Fuente: Modificada a partir de Itani et al. (2016).

Sus resultados fueron desalentadores observando decrementos de la resistencia a la flexión en todos los casos de entre todas las combinaciones posibles de su investigación. Las vigas que tenían un menor número de capas de geomalla como refuerzo fueron las que menor resistencia a la flexión presentaron, respecto de las que tenían un mayor número de capas. Sin embargo, se pudo observar también que el refuerzo de geomalla, a pesar de reducir su resistencia a la flexión, produce una falla dúctil en los elementos, disminuyendo considerablemente las aberturas de grieta en todos los casos. El refuerzo con 5 capas de geomalla fue la única combinación que se acerca al valor de resistencia obtenido por el concreto patrón, con un 99% y 95% para las muestras No. 2 y 3 respectivamente (ver Tabla 2.5).

Tabla 2.5 Resumen de los resultados de prueba.

Muestra No.	Resistencia a la flexión (N/mm ²)				Resistencia respecto al concreto base (%)		
	Concreto base	Refuerzo con geomalla			Refuerzo con geomalla		
		1 capa	3 capas	5 capas	1 capa	3 capas	5 capas
1	41.05	23.18	31.6	-	56%	77%	-
2	45.2	29.85	33.72	44.96	66%	75%	99%
3	50.85	31.61	38.64	48.47	62%	76%	95%

Fuente: Modificada a partir de la realizada por Rakendu y Anagha (2017).

Al-Hedad et al. (2017) investigaron el comportamiento de una geomalla biaxial de polipropileno colocada a diferentes alturas con el objetivo de reducir las grietas por contracción del concreto hidráulico mediante procedimientos con condiciones ambientales controladas. El refuerzo fue aplicado en dos diferentes especímenes de concreto, el primero se trató de vigas de 75x75x280 mm mientras que el segundo espécimen se trató de una losa de 30x280x280 mm. Para las vigas, la geomalla como refuerzo fue colocada en el primer tercio superior de altura y a la mitad, mientras que para la losa el refuerzo fue colocado únicamente a la mitad de la altura. Los resultados fueron variables, para las vigas cuyo refuerzo fue colocado en el tercio superior la contracción incrementó entre un 7 y 8 % a lo largo de todas las edades analizadas (7, 14, 21, 28 y 56 días) respecto a la muestra base; en las vigas donde el refuerzo fue colocado en la parte media la contracción también incrementó entre un 5 y 6 % a lo largo de todas las edades analizadas (7, 14, 21, 28 y 56 días) respecto a la muestra base; finalmente, para las losas, la contracción se redujo en un 4% promedio a la edad final de 56 días.

Adicionalmente, diversos investigadores han logrado retardar e incluso mitigar la aparición de grietas por reflexión de los pavimentos rígidos existentes debajo de nuevas capas de rodamiento compuestas por carpetas asfálticas (Cleveland et al., 2002), debido a que las geomallas distribuyen de mejor manera los esfuerzos

producidos en la superficie reduciendo la profundidad alcanzada por los esfuerzos aplicados en la capa de rodamiento hacia las capas inferiores (Abdessemed et al., 2015) y aumentando el número de ciclos permisibles antes de que se presente la fatiga, así como un retardo en la propagación de las grietas hacia la superficie (Cleveland et al., 2002). Así mismo, se ha logrado observar que el uso de geomallas dentro de una carpeta asfáltica permite absorber los desplazamientos verticales equivalentes a la mitad del espesor de la capa de base hidráulica (Correia y Zornberg, 2018) e incrementa sustancialmente su elasticidad y la resistencia al agrietamiento (Komatsu, 1998).

2.12 PET

El politereftalato de etileno, tereftalato de polietileno, polietileno tereftalato o polietilentereftalato (por sus siglas en inglés, PET) es un tipo de plástico muy utilizado en el sector de la alimentación, se caracteriza por una alta relación resistencia/densidad, que son propiedades excelentes para el aislamiento térmico y eléctrico y de buena resistencia a los ácidos, álcalis y solventes (Cristán et al., 2003). Los plásticos con mayor presencia en los residuos urbanos son el polietileno y el PET, debido a que representan la mayor proporción en los envases y embalajes (Subramanian, 2000). La participación porcentual de los envases PET no retornables en el mercado es muy significativa (65.8 %) seguido de los envases de vidrio (11.9 %) y de aluminio (6.6 %). (ANPRAC, 2008).

Ferro et al. (2008) señalan que el uso masivo y de otros materiales polímeros por el sector empresarial y doméstico, ha originado una nueva contaminación ambiental: los desechos plásticos, que por su alta resistencia a los agentes biológicos y atmosféricos, son productos nocivos al medio ambiente. De acuerdo con datos de la SEMARNAT, en México se generan diariamente 102,895 toneladas de residuos, de los cuales se recolecta el 83.93% y se envían a sitios de disposición final el 78.54%, reciclando únicamente el 9.63% de los residuos generados (SEMARNAT, 2017), en 2012 los plásticos representaban poco más del 12% de la cantidad de

sólidos urbanos (INECC y SEMARNAT, 2012) y la tendencia indicó un crecimiento promedio anual del 3.03% de la industria del plástico en México del 2003 al 2013 (Góngora, 2014).

Los plásticos presentan ciertas ventajas frente a otros materiales debido su bajo peso, son durables y de menor costo (Andrady & Neal, 2009). Jefferson Hopewell et al. (2009) señalan que una gran parte del plástico producido cada año se utiliza para fabricar artículos desechables u otros productos de vida corta que se desechan un año después de su fabricación, estas dos observaciones por sí solas indican que nuestro uso actual de plásticos no es sostenible. México es uno de los países que recupera poco más del 50% de los envases de PET (ECOCE, 2011). Independientemente de las disposiciones para el reciclado que establezcan los gobiernos, en la construcción se pueden emplear algunos materiales, como en este caso el PET, para la optimización de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de dichos materiales.

Encarnación et al. (2013) afirman que los esquemas de acopio y reciclaje de PET en México presentan ventajas ambientales importantes por la sustitución de resinas vírgenes en el mercado. Los esquemas de acopio y reciclaje mejoran la eficiencia del uso de los recursos naturales y disminuyen las emisiones generadoras de potenciales de impactos ambientales. Mientras que Vázquez et al. (2016) concluyen en que el reciclaje es, sin duda, una de las estrategias de manejo de residuos que permite reducir los impactos ambientales asociados a los mismos, además de que puede constituirse como una actividad económica rentable, que genere empleo y contribuya al desarrollo económico.

Gómez (2016) enfatiza que hay que generar conciencia sobre el daño que puede derivar o que está desencadenando la utilización del plástico. Además, indica tener conocimiento de lo que esto trae como consecuencia y advierte que no son suficientes las técnicas que se están implementando para disminuirlo, se hace necesario de estrategias más agresivas que incluyan a toda la comunidad mundial.

En la construcción existen diversos campos en donde se puede llevar a cabo la reutilización de PET para el mejoramiento de las características de ciertos materiales, así como emplearlo como sustituto o aditivo en otros tantos materiales de la industria de la construcción, como es, en el caso de esta investigación, el concreto hidráulico.

2.13 CONCRETO HIDRÁULICO UTILIZANDO PET

Lopes et al., (2017) elaboraron cilindros de 10x20 cm para analizar su comportamiento a compresión y tensión luego de adicionar fibras de PET variando las dimensiones de las fibras, desde 10 a 22 mm, y la cantidad agregada a la mezcla de concreto, desde 0.05 hasta 0.34 %. Para todos los casos obtuvieron incrementos en la resistencia a la compresión de hasta 14.3% y en la resistencia a la tensión de hasta 16.6%, tal y como lo indica la Tabla 2. 6.

Tabla 2. 6 Resumen de resultados a compresión y tensión de la investigación.

Ensayo No.	Longitud de fibra (mm)	Cantidad de fibras (%)	Eficiencia (%)	
			Compresión	Tensión
1	10	0.1	14.3	8.9
2	10	0.3	9.9	6.2
3	20	0.1	9.7	16.5
4	20	0.3	7.9	9.8
5	7.9	0.2	7.2	7.4
6	22	0.2	4.5	11.7
7	15	0.05	13.4	16.6
8	15	0.34	9.2	12.1
9	15	0.2	5	10.4
10	15	0.2	6.1	12.6
11 (Base)	-	-	-	-

Fuente: Modificada a partir de los datos presentados por Lopes et al. (2017)

Baldenebro (2015) presenta el análisis de un concreto reforzado con fibras de PET variando únicamente la cantidad adicionada de fibras, donde los resultados a compresión disminuyen hasta un 6.5% respecto a un concreto sin fibras, mientras que la resistencia a la flexión se incrementa desde un 9% hasta en un 178.7%, siendo prácticamente proporcional el incremento de la resistencia a la flexión con el porcentaje adicionado de fibras.

Tabla 2.7 Resultados de resistencia a la flexión y compresión

Espécimen	$f'c$ (MPa)	Pmax (kN)	δ max (mm)	R (MPa)
V-1c	21.71	4.97	0.68	2.49
V-2c	20.90	5.59	2.43	2.80
V-3c	21.43	5.66	6.25	2.83
V-4c	20.72	5.43	16.58	2.72
V-5c	21.81	8.24	11.51	4.12
V-6c	20.58	9.29	25.87	4.65
V-7c	20.31	13.87	34.35	6.94

Fuente: Baldenebro (2015)

Saikia y de Brito (2012) utilizaron el PET reciclado y triturado en sustitución de agregado grueso y fino dentro de una matriz de concreto. Empleando tres diferentes tamaños de agregados de PET (a: grueso; b: fino; c: de forma granular) y tres porcentajes de sustitución (5, 10 y 15 %), obtuvieron resultados desfavorables a una edad final de 91 días para ensayos de compresión con una resistencia mínima alcanzada del 39% respecto a la muestra base para el máximo porcentaje sustituido y para el tipo de agregado de PET grueso. En general se observó que mientras mayor sea el tamaño de agregados de PET, así como un mayor porcentaje de sustitución, la resistencia a la compresión se verá severamente disminuida.

Tabla 2. 8 Resistencias a compresión

Ensayo No.	Porcentaje de sustitución	Tipo de agregado de PET	Resistencia a la compresión (Mpa)	Resistencia alcanzada
1 (base)	-	-	46.19	-
2		a	33.94	73%
3	5%	b	40.63	88%
4		c	40.88	89%
5		a	25.01	54%
6	10%	b	33.87	73%
7		c	38.93	84%
8		a	17.88	39%
9	15%	b	29.59	64%
10		c	35.4	77%

Fuente: Saika y de Brito (2012)

De acuerdo con los antecedentes observados, se puede concluir que el PET siendo utilizado como sustituto de los agregados pétreos tiende a no cumplir con los estándares de diseño de un concreto hidráulico convencional. Sin embargo, cuando ha sido añadido como fibras, en porcentajes limitados, su comportamiento es favorable, principalmente, en tensión y flexión. Estos resultados son prometedores para la investigación de concreto hidráulico reforzado con PET, cuyos avances han ido poco a poco durante las últimas décadas, atendiendo problemas ambientales y, sobre todo, como alternativa para el mejoramiento de la resistencia a flexión del concreto. El uso de PET como geomalla no ha tenido investigaciones contundentes hasta el momento, por ello se plantea adentrarse en esta investigación. Una de las principales causas de falla en las losas de un pavimento rígido es el tránsito repetitivo sobre la vía (Baamonde et al., 2011). Tomando como referencia estos factores, se analizará el refuerzo con geomalla biaxial de PET en la losa de concreto de los pavimentos rígidos.

3. METODOLOGÍA

En este apartado se describe la serie de pasos que se realizaron para analizar las ventajas del uso de una geomalla de PET como refuerzo en el concreto hidráulico.

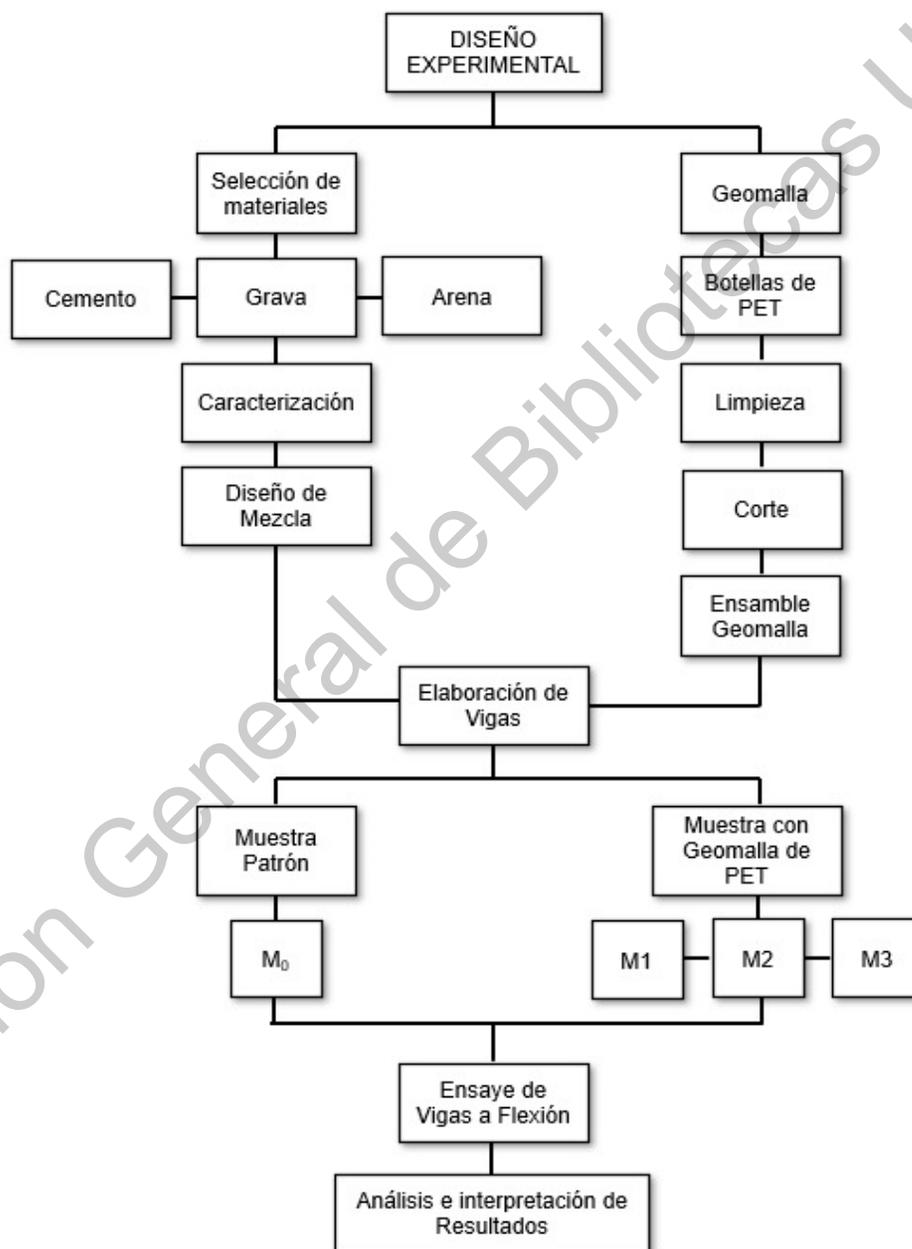


Figura 3. 1. Matriz experimental de la investigación

Fuente: Elaboración propia

El diseño de experimentos o matriz experimental se realizó partiendo del diseño de mezcla obtenido mediante el método del American Concrete Institute (por sus siglas en inglés, ACI), elaborando una muestra patrón compuesta por 4 vigas de concreto simple para su posterior ensaye a 7, 14 y 28 días. Posteriormente, se realizan 3 muestras adicionales reforzando las vigas de concreto con la geomalla de PET previamente fabricada. Tanto la elaboración de especímenes como el ensaye de estos se realizan en condiciones similares para evitar un sesgo en los resultados. Las condiciones por tomar en cuenta son: dosificación de los agregados, humedad de sitio de los agregados, equipo de mezclado de los agregados, temperatura ambiente y tiempo de elaboración de los especímenes. Para la elaboración de la geomalla, se seleccionaron únicamente dos marcas comerciales (una de agua purificada y otra de refresco) que sus botellas de PET compartían características físicas similares.

3.1 MATERIALES

Los materiales empleados para la elaboración de las vigas de concreto son los que comúnmente se utilizan en la fabricación de concreto hidráulico: arena, grava y cemento Portland. Para la obtención de los agregados pétreos (arena y grava) se realizó una búsqueda intensiva de las fuentes de material existentes que se encontraran habilitadas en la ciudad de Medellín, Antioquia, Colombia, los cuales tuvieran antecedentes de cumplir con la normativa vigente local, mismos que se evaluaron posteriormente con la norma mexicana de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) (N.CMT.2.02.002, 2019) el banco seleccionado tanto para el agregado grueso como para el agregado fino, fue la planta de la región Bello de la empresa CONASFALTOS. El tipo de cemento utilizado fue el Argos gris de uso general, por ser el más utilizado en las obras de construcción y proyectos de investigación de la propia Universidad de Medellín. Adicionalmente se utilizaron tiras de PET obtenidas de las botellas de agua y de refresco desechadas a la basura.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS

La caracterización de los agregados pétreos se realizó de acuerdo con las normas mexicanas de la SCT: (M.MMP.2.02.020, 2018) para la granulometría de los agregados pétreos, (M.MMP.2.02.023, 2018) para la masa volumétrica de los agregados pétreos, (M.MMP.2.02.032, 2018) para la resistencia a la degradación del agregado grueso mediante la máquina de Los Ángeles, (M.MMP.1.04, 2003) para el contenido de agua, (M.MMP.1.05, 2018) para las densidades relativas y absorción.

3.2.1 Agregados Gruesos

La grava estuvo comprendida desde el tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ " hasta el retenido en la malla No. 4.

3.2.1.1 Granulometría de los Agregados Gruesos

De acuerdo con la norma mexicana M.MMP.2.02.020/18 se evaluó la distribución granulométrica de los agregados grueso esta norma te permite determinar la distribución de los agregados empleados en la mezcla de concreto hidráulico.

Resumen de la prueba. Se reduce la muestra al tamaño de la prueba de acuerdo al tamaño máximo del agregado. Después la muestra es secada en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta masa constante y se determina la masa (W_{PP}), se deposita la porción del agregado a partir de la malla del tamaño máximo hasta la malla No. 4, se hace pasar el material hasta que no pase más del 1% de la masa del material retenido. Usando la masa del material retenido acumulado en la malla i (R_i), y la masa del material retenido en la malla i , g, (W_{Ri}) es posible determinar la distribución granulométrica de los agregados de la siguiente manera (Ecuación 3.1):

$$R_i = \frac{\sum W_{Ri-1} + W_{Ri}}{W_{PP}} * 100 \quad \text{Ec. 3.1}$$



Figura 3.2 Ensayo de distribución granulométrica del agregado grueso

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.2 Masa volumétrica del agregado grueso

Conforme a la norma M.MMP.2.02.023/18 se determinó la masa volumétrica de los agregados gruesos que fueron empleados para la elaboración del concreto hidráulico.

Resumen de la prueba. Pesar el recipiente vacío (W_v); en kg, colocar la muestra dentro del recipiente hasta 1/3 parte del volumen del recipiente, se aplican 25 penetraciones distribuidas uniformemente sobre la superficie del material, se coloca una segunda capa aplicando nuevamente 25 penetraciones y por último la tercera capa compactando 25 penetraciones, enrasar con la regla el material, pesar el recipiente con el material (W_i); en kg. Determinar la masa del agregado pétreo (W_a) mediante la diferencia de la masa del recipiente lleno con el agregado (W_i) y la masa del recipiente vacío (W_v) de la siguiente manera (Ecuación 3.2).

$$W_a = W_i - W_v \quad \text{Ec. 3.2}$$



Figura 3.3 Ensayo de masa volumétrica del agregado grueso

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.3 Resistencia a la degradación mediante Desgaste de Los Ángeles

Mediante el manual M.MMP.2.02.032/18 se determinó la resistencia a la degradación por trituración de los agregados pétreos para concreto hidráulico.

Resumen de la prueba. Se coloca una muestra dentro de la máquina de los ángeles (M_i), en donde se somete a impacto carga abrasiva durante un tiempo determinado y se registra la masa final (M_f) midiendo la diferencia entre la masa que pasa la malla No. 12 después de ser sometida a la prueba, el cálculo se hace por medio de la siguiente fórmula (Ecuación 3.3).

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{M_i}{M_f} * 100 \quad \text{Ec. 3.3}$$



Figura 3.4 Ensayo de degradación mediante Desgaste de Los Ángeles
Fuente: Elaboración propia

3.2.1.4 Contenido de agua del agregado grueso

Conforme al manual M.MMP.1.04/03 se determinó el contenido de agua en los agregados gruesos a emplear para el concreto hidráulico, con el fin de obtener una idea cualitativa de su consistencia o su probable comportamiento.

Resumen de la prueba. Secar una muestra del material en el horno y determinar el porcentaje de la masa del agua. La determinación del agua se efectúa pesando el material húmedo (W_1) menos el material seco (W_2) en porcentaje, de la siguiente manera (Ecuación 3.4).

$$w = \frac{W_1}{W_2} * 100$$

Ec. 3.4



Figura 3.5 Determinación del contenido de agua del agregado grueso

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.5 Densidad relativa y absorción del agregado grueso

Conforme al manual M.MMP.1.05/18 se determinó la densidad relativa y absorción del agregado grueso, esta prueba permite determinar la relación de masa-volumen de los materiales respecto a la relación masa-volumen del agua, así como la absorción del material y se utiliza para calcular los volúmenes ocupados por el material o mezcla en sus diferentes condiciones de contenidos de agua.

Resumen de la prueba. Tomar aproximadamente 5 kg de la muestra retenida en la Malla No. 4, lavar y secar a una temperatura de 105 ± 5 °C hasta masa constante, sumergir en agua la muestra durante 24 horas, retirar la muestra y determinar la masa saturada superficialmente seca (W_i). Ubicar el picnómetro sobre una superficie horizontal y llenar con agua destilada hasta el nivel de derrame, colocar una probeta graduada bajo el grifo. Subsecuente, sumergir el material en el picnómetro y recolectar el agua de la probeta y registrar el volumen (V_1); en cm^3 ,

verter el material en una charola y secar en el horno a una temperatura de 105 ± 5 °C. Se determina la masa de la muestra seca (W_s). Usando las masas obtenidas se determina la densidad de la siguiente manera (Ecuación 3.5):

$$d_s = \frac{W_s}{V_m - (W_i - W_s)} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Para determinar la absorción del material, se emplea la siguiente expresión (Ecuación 3.6):

$$W_{ab} = \frac{W_i - W_s}{W_s} * 100 \quad \text{Ec. 3.6}$$



Figura 3.6 Ensayo de densidad y absorción del agregado grueso

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Agregado Fino

3.2.2.1 Granulometría de los Agregados Finos

De acuerdo con la norma mexicana M.MMP.2.02.020/18 se evaluó la distribución granulométrica de los agregados finos esta norma te permite determinar la distribución de los agregados empleados en la mezcla de concreto hidráulico.

Resumen de la prueba. Se reduce la muestra a un tamaño mínimo de 500 g. Después la muestra es secada en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta masa constante y se determina la masa (W_{PP}), se deposita la porción del agregado a partir de la Malla No. 4 para hacer pasar el material hasta la malla No. 200, y que no pase más del 1% de la masa del material retenido. Usando la masa del material retenido acumulado en la malla i (R_i), y la masa del material retenido en la malla i , g , (W_{Ri}) es posible determinar la distribución granulométrica de los agregados de la siguiente manera (Ecuación 3.7):

$$R_i = \frac{\sum W_{Ri-1} + W_{Ri}}{W_{PP}} * 100 \quad \text{Ec. 3.7}$$



Figura 3.7 Ensayo de distribución Granulométrica de Agregados Finos

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.2 Módulo de Finura

El módulo de finura de los agregados (M_{SF}) se determina como la suma de los retenidos acumulados de cada malla (R_i) que se utilizaron para determinar su granulometría, de la siguiente manera (Ecuación 3.8):

$$M_{SF} = \frac{\sum R_i}{100} \quad \text{Ec. 3.8}$$

Las mallas que indica la normativa mexicana de la SCT N.CMT.2.02.002/19 para la determinación de la granulometría y el módulo de finura, de acuerdo con su designación, son: 3/8", No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50 y No. 100.

3.2.2.3 Masa volumétrica del agregado fino

Conforme a la norma M.MMP.2.02.023/18 se determinó la masa volumétrica de los agregados fino que fueron empleados para la elaboración del concreto hidráulico.

Resumen de la prueba. Pesar el recipiente vacío (W_v); en kg, colocar la muestra dentro del recipiente hasta 1/3 parte del volumen del recipiente, se aplican 25 penetraciones distribuidas uniformemente sobre la superficie del material, se coloca una segunda capa aplicando nuevamente 25 penetraciones y por último la tercera capa compactando 25 penetraciones, enrasar con la regla el material, pesar el recipiente con el material (W_i); en kg. Determinar la masa del agregado pétreo (W_a) mediante la diferencia de la masa del recipiente lleno con el agregado (W_i) y la masa del recipiente vacío (W_v) de la siguiente manera (Ecuación 3.9).

$$W_a = W_i - W_v \quad \text{Ec. 3.9}$$



Figura 3.8 Masa volumétrica compacta del agregado fino

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.4 Contenido de agua del agregado fino

Conforme al manual M.MMP.1.04/03 se determinó el contenido de agua en los agregados finos a emplear para el concreto hidráulico, con el fin de obtener una idea cualitativa de su consistencia o su probable comportamiento.

Resumen de la prueba. Secar una muestra del material en el horno y determinar el porcentaje de la masa del agua. La determinación del agua se efectúa pesando el material húmedo (W_1) menos el material seco (W_2) en porcentaje, de la siguiente manera (Ecuación 3.10).

$$w = \frac{W_1}{W_2} * 100 \quad \text{Ec. 3.10}$$



Figura 3.9 Contenido de agua del agregado fino

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.5 Densidad relativa y absorción del agregado fino

Conforme al manual M.MMP.1.05/18 se determinó la densidad relativa y absorción del agregado fino, esta prueba permite determinar la relación de masa-volumen de los materiales respecto a la relación masa-volumen del agua, así como la absorción del material y se utiliza para calcular los volúmenes ocupados por el material o mezcla en sus diferentes condiciones de contenidos de agua.

Resumen de la prueba. Una muestra de mínimo 500 g es sumergida en agua limpia a una temperatura de 15 a 25 °C durante 24 horas. Después la muestra es retirada, secada superficialmente y pesada (W_i). Subsecuentemente se acondiciona la muestra en el matraz hasta temperatura ambiente y se pesa el material (W_{ew}) y se procede a colocar el material en una charola para dejar secar en el horno a una temperatura de 105 ± 5 °C. Empleando la Ecuación 3.11 se determina su densidad y su absorción Ecuación 3.12, de la siguiente manera:

$$d_s = \frac{W_s}{W_{ew} - W_i} \quad \text{Ec. 3.11}$$

Para determinar la absorción del material, se emplea la siguiente expresión (Ecuación 3.12):

$$W_{ab} = \frac{W_i - W_s}{W_s} * 100 \quad \text{Ec. 3.12}$$



Figura 3.10 Densidad y absorción del agregado fino
Fuente: Elaboración propia

3.3 DISEÑO DE MEZCLA

El diseño de la mezcla se realizó mediante el método del American Concrete Institute (por sus siglas en inglés, ACI), con una resistencia a la compresión (f'_c) de 350 kg/cm^2 y con la que se esperó una resistencia a la flexión (MR) mínima de 42

kg/cm². El método toma en cuenta el tamaño máximo del agregado grueso, densidades de la grava, arena y cemento, masas volumétricas de la grava y arena, módulo de finura de la arena y relación agua/cemento para alcanzar la resistencia a la compresión deseada, así como el revenimiento esperado de la mezcla. A partir del diseño de mezcla, se obtuvo la proporción, en peso, de: cemento, arena, grava y agua; para el volumen calculado de concreto para cada muestra de 4 vigas de concreto de 15x15x60 cm. A continuación, se muestran las consideraciones y tablas que contempla el método:

- 1) Selección del revenimiento de proyecto, de acuerdo con lo recomendado en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Revenimientos recomendados para varios tipos de construcciones.

Tipo de construcción	Revenimiento, en cm	
	máximo**	mínimo
Muros de cimentación y zapatas reforzadas.	8	2
Zapatas, campanas y muros de subestructura sencillos.	8	2
Vigas y muros reforzados.	10	2
Columnas para edificio.	10	2
Pavimentos y losas.	8	2
Concreto masivo.	5	2
** Pueden incrementarse en 2,5 cm para métodos de compactación que no sean mediante vibración.		

- 2) Determinación del tamaño máximo nominal:

Tamaño máximo nominal (TMN): $\frac{3}{4}$ " = 19.05 mm

- 3) Estimación de la cantidad de agua en función del tamaño máximo nominal y del revenimiento de proyecto:

Tabla 3. 2. Cantidad de agua para los diferentes tamaños máximos de agregado y el revenimiento.

Revenimiento (cm)	Agua kg/m ³ de concreto para los tamaños máximos de agregado indicados, en mm							
	10	12.5	20	25	40	50	70	150
Concreto sin aire incluido								
de 3 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
de 8 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
de 15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	--
Cantidad aprox. De aire atrapado en concreto sin inclusión de aire.								
	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
Concreto con aire incluido								
de 3 a 5	180	175	165	160	145	140	135	120
de 8 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
de 15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	--

- 4) Determinación de la relación agua/cemento a partir de la resistencia de proyecto:

Tabla 3. 3. Selección de la relación agua/cemento.

Resistencia a la compresión a los 28 días kg/cm ² **	Concreto sin aire incluido.	Concreto con aire incluido.
450	0,38	----
400	0,43	----
350	0,48	0,40
300	0,55	0,46
250	0,62	0,53
200	0,70	0,61
150	0,80	0,71

- 5) Cálculo de la cantidad de cemento en masa (kg) para 1 m³ de concreto hidráulico:

$$\text{Cemento (kg)} = \text{agua (kg)} / \text{relación agua-cemento}$$

- 6) Selección de la cantidad de grava en volumen (m³) para 1 m³ de concreto hidráulico en función del tamaño máximo nominal y el módulo de finura de la arena:

Tabla 3. 4. Cantidad de grava en volumen.

Tamaño máximo del agregado (mm).	Volumen del agregado grueso ** varillado en seco por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de la arena.				Volumen del agregado grueso ** varillado en seco por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de la arena			
	Mod. de finura	2,40	2,60	2,80	3,00	3,00	3,20	3,40
10	0,50	0,48	0,46	0,44	0,44	0,42	0,40	0,38
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53	0,53	0,51	0,49	0,47
20	0,66	0,64	0,62	0,60	0,60	0,58	0,56	0,54
25	0,71	0,69	0,67	0,65	0,65	0,63	0,61	0,59
40	0,76	0,74	0,72	0,70	0,70	0,68	0,66	0,64
50	0,78	0,76	0,74	0,72	0,72	0,70	0,68	0,66
70	0,81	0,79	0,77	0,75	0,75	0,73	0,71	0,69
150	0,87	0,85	0,83	0,81	0,81	0,79	0,77	0,75

- 7) Cálculo de la cantidad de grava en masa (kg) para 1 m³ de concreto hidráulico:

$$\text{Grava (kg)} = \text{grava (m}^3\text{)} / \text{masa vol. grava (kg/m}^3\text{)}$$

- 8) Cálculo de la cantidad de arena en volumen (m³) para 1 m³ de concreto hidráulico mediante la diferencia de las cantidades de grava, agua y cemento previamente obtenidas:

$$\text{Arena (m}^3\text{)} = [1000 - (\text{grava (kg)} / \text{densidad grava}) - (\text{agua (kg)} / 1) - (\text{cemento (kg)} / \text{densidad cemento})] / 1000$$

- 9) Cálculo de la cantidad de arena en masa (kg) para 1 m³ de concreto hidráulico:

$$\text{Arena (kg)} = \text{arena (m}^3\text{)} / \text{masa vol. arena (kg/m}^3\text{)}$$

3.4 CORTE DE TIRAS DE PET

Para la elaboración de la geomalla se recolectaron botellas vacías de PET de agua purificada o refresco de una misma marca comercial con capacidad de entre 500 a 2000 ml. Posteriormente, se les retiró la tapa y etiquetas que pudieran llegar a tener para después ser lavadas con agua, retirando cualquier líquido remanente en el embace. El corte se realizó mediante un dispositivo fabricado especialmente para dicho proceso, mostrado en la Figura 2. El ancho promedio de las tiras de PET fue de 1.6 cm con una longitud mínima de 60 cm. De manera manual, se fabricó una malla de 15x60 cm con tres tiras longitudinales a cada 5.1 cm y con siete tiras de manera transversal a cada 8.13 cm. En cada nodo se realizó un pequeño corte para entrelazar las tiras y para finalmente ser fijadas con dos grapas (ver Figura 3.11).



Figura 3.11 Dispositivo fabricado para el corte de las botellas de PET en tiras.
Fuente: Elaboración propia

3.5 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES

De acuerdo con el diseño experimental, se realizaron 4 muestras de 4 vigas de concreto hidráulico conforme a la norma mexicana (NMX-C-159-ONNCCE, 2016) para su ensaye de resistencia a la flexión a edades de 7, 14 y 28 días. La primera muestra se elaboró como muestra base (sin geomalla) mientras que a las tres restantes se les colocó la geomalla, previamente fabricada, al primer tercio de altura de la viga, colocada de manera manual durante el vaciado de concreto, véase la Figura 3.12.



Figura 3.12 Colocación de la geomalla de PET fabricada dentro de la viga de concreto.

Fuente: Elaboración propia

La elaboración de las muestras de vigas de concreto se llevó a cabo en cuatro jornadas, las variables ambientales de temperatura y humedad relativa estuvieron en condiciones normales. Para cada jornada se realizó el cálculo de corrección por humedad empleando el contenido de humedad del agregado (w , %) y la absorción del agregado (%) para determinar la cantidad de agua tanto para la arena como para la grava, con la Ecuación 3.13 mostrada a continuación:

$$a = \frac{(w-abs) kg}{100} \quad \text{Ec. 3.13}$$

Donde:

w = humedad del agregado (%)

abs = absorción del agregado (%)

kg = cantidad calculada del agregado en el diseño de mezcla (kg)

a = cantidad de agua por agregar o quitar al diseño de mezcla (kg)

3.6 CORRECCIÓN POR HUMEDAD

Una vez obtenida la cantidad de agua por retirar o adicionar de la cantidad de agua inicial, calculada en el diseño de mezcla, tanto de la grava como de la arena, en función de su humedad y absorción, se emplea la ecuación 2 para finalmente:

$$a_{inicial} - (a_{grava} + a_{arena}) = a_{final} \quad \text{Ec. 3. 14}$$

Donde:

$a_{inicial}$: cantidad de agua inicial, calculada en el diseño de mezcla (kg)

a_{grava} : cantidad de agua por retirar o adicionar a partir de la humedad de la arena a partir de lo calculado en el diseño de mezcla (kg)

a_{arena} : cantidad de agua por retirar o adicionar a partir de la humedad de la arena a partir de lo calculado en el diseño de mezcla (kg)

a_{final} : cantidad de agua ajustada para la homogenización de la mezcla (kg)

3.7 MEDICIÓN DEL REVENIMIENTO

La medición del revenimiento (Figura 3.12) de cada mezcla se realizó tal y como lo establece la normativa mexicana de la SCT (M.MMP.2.02.056, 2006) “revenimiento del concreto fresco”, obteniendo en todos los ensayos resultados favorables, de acuerdo con el diseño de mezcla. Cada espécimen se curó de acuerdo con la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2016) “elaboración y curado de especímenes de ensayo”.



Figura 3.13 Medición del revenimiento en el concreto

Fuente: Elaboración propia

3.8 ENSAYE DE ESPECÍMENES

De acuerdo con la norma (NMX-C-303-ONNCCE, 2010) “determinación de la resistencia a la flexión usando una viga simple con carga en el centro del claro”, se realizaron ensayos a 7, 14 y 28 días para determinar la resistencia a la flexión de las vigas de concreto. Debido a que todos los ensayos presentaron la fractura en el tercio medio del claro de la viga, el módulo de rotura se calculó con la siguiente Ecuación 3.15, de acuerdo con la norma:

$$MR = \frac{PL}{bd^2} \quad \text{Ec. 3.15}$$

Donde:

MR : módulo de rotura (kg/cm^2)

P : carga máxima aplicada (kg)

L : distancia entre apoyos (cm)

b : ancho promedio del espécimen (cm)

d : peralte promedio del espécimen (cm)

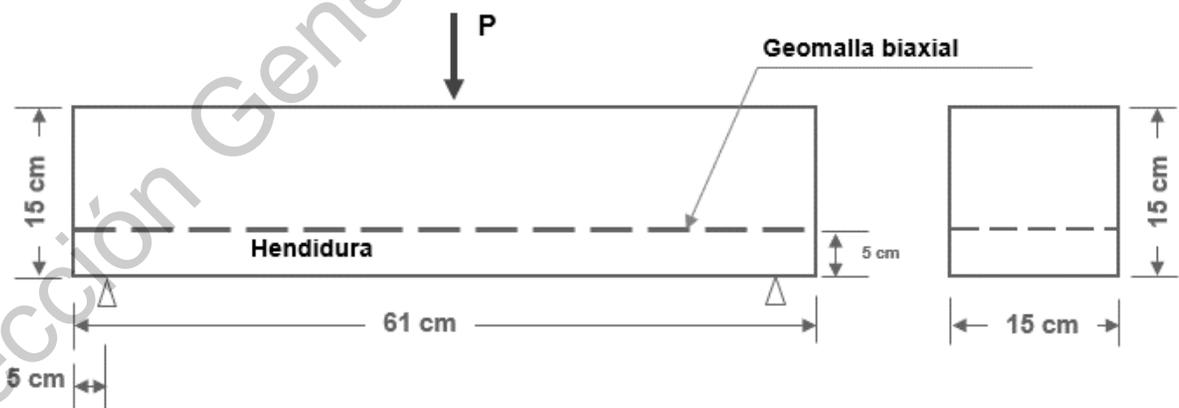


Figura 3.14 Sección longitudinal típica que muestra la posición de carga y la disposición de la geomalla como refuerzo.

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.15 Ensayo de resistencia a la flexión
Fuente: Elaboración propia

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

El banco seleccionado para la utilización tanto del agregado grueso como del agregado fino para la elaboración del concreto hidráulico empleado en esta investigación fue la planta de la región Bello de la empresa CONASFALTOS, en las tablas 4.1 y 4.2 se muestran los resultados de la caracterización de los agregados, así como las respectivas curvas granulométricas en las figuras 4.1 y 4.2. Se tomó la determinación de emplear un tamaño máximo nominal de 19.05 mm, buscando que los tamaños mayores de los agregados pudieran pasar a través de las aberturas de la geomalla para evitar la segregación de partículas y permitir un adecuado acomodo entre ellas. La caracterización de los agregados para el concreto hidráulico se realizó de acuerdo con la normativa mexicana de la SCT y el manual del laboratorio de ingeniería en materiales UAQ, Facultad de Ingeniería.

Tabla 4.1 Resultados de la caracterización del agregado grueso.

Característica	Valor
Tamaño máximo nominal (mm)	19.05
Densidad (adim.)	2.71
Masa volumétrica seca compacta (kg/m ³)	1,772
Absorción (%)	0.69
Humedad de sitio (%)	1.07
Desgaste de los Ángeles (%)	17.4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. 2. Resultados de la caracterización del agregado fino.

Característica	Valor
Módulo de finura (adim.)	3.44
Densidad (adim.)	2.58
Masa volumétrica seca compacta (kg/m ³)	1,736
Absorción (%)	1.40
Humedad de sitio (%)	5.41

Fuente: Elaboración propia.

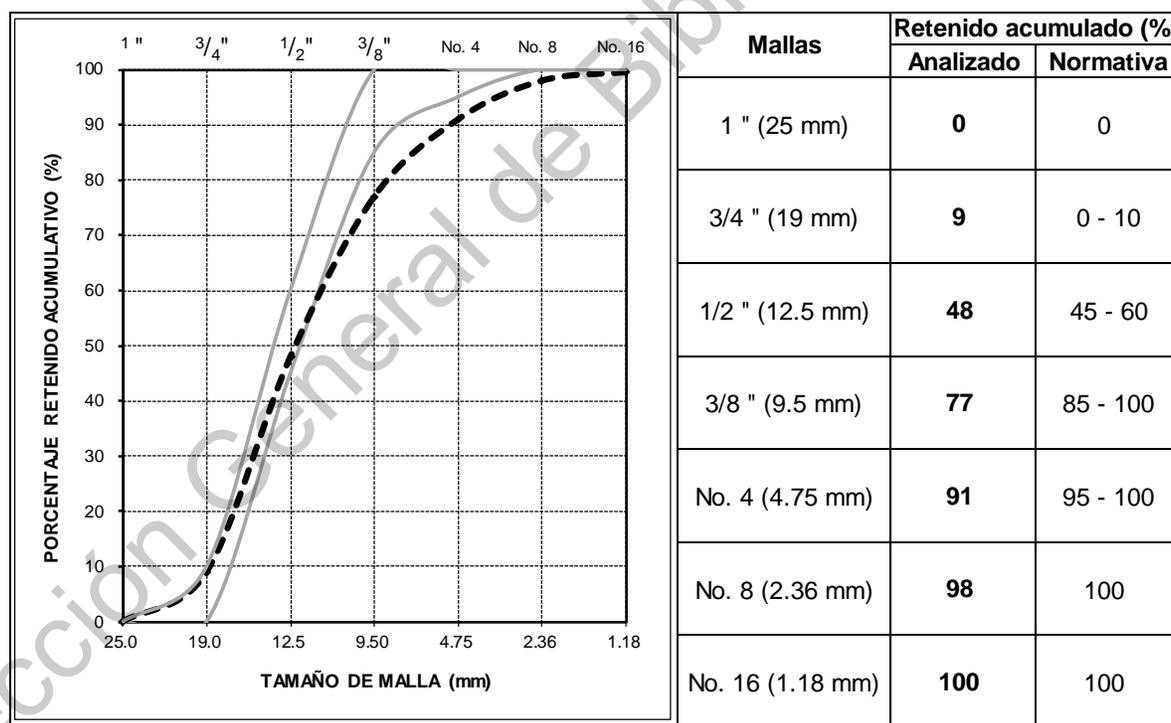


Figura 4. 1. Composición granulométrica del agregado grueso.

Fuente: Elaboración propia.

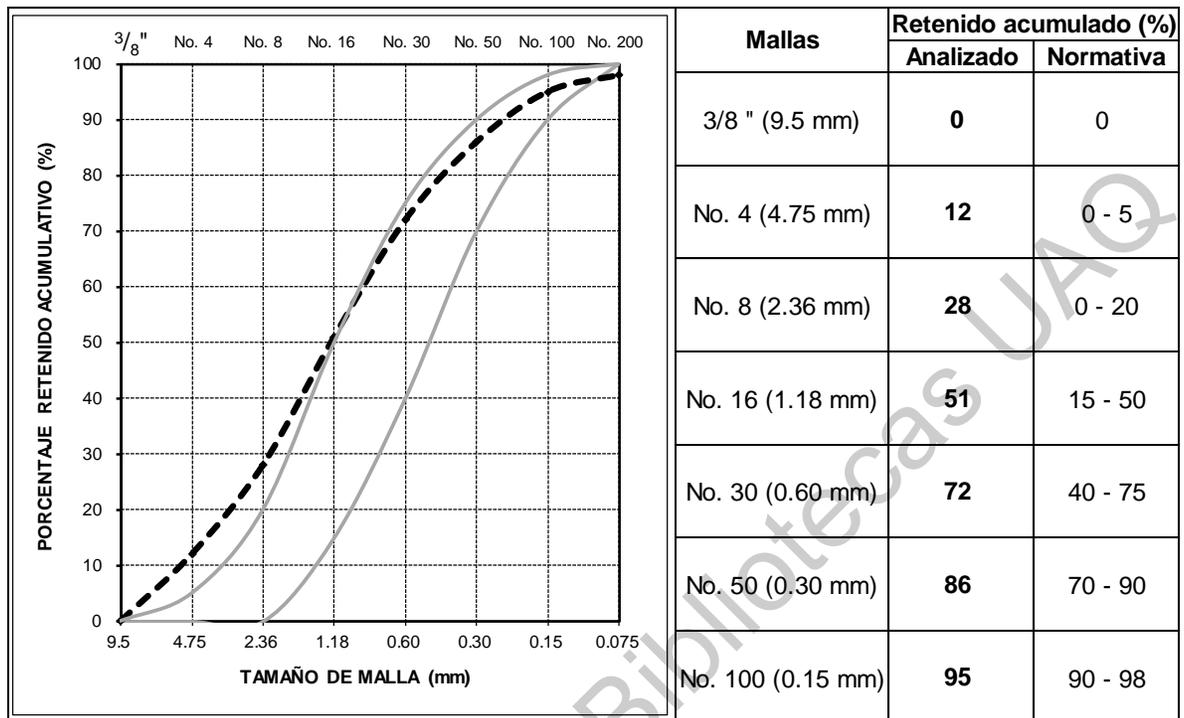


Figura 4. 2. Composición granulométrica del agregado fino.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que los valores analizados de los agregados pétreos se encuentran dentro de los parámetros que establece la normativa de la SCT como características de calidad de para materiales para concreto hidráulico y dentro de lo tolerable con valores cercanos a los límites establecidos para las composiciones granulométrica de los agregados.

4.2 DISEÑO DE MEZCLA

Tomando en cuenta los valores obtenidos durante la caracterización de los agregados, el proporcionamiento del diseño de concreto hidráulico mediante el método del ACI empleado para esta investigación se presenta en la Tabla 4.3 para una resistencia a la compresión (f'_c) de 350 kg/cm² y con la que se esperó una resistencia a la flexión (MR) mínima de 42 kg/cm².

Tabla 4. 3. Proporcionamiento para 1 m³ de concreto hidráulico.

MATERIAL	CANTIDADES PARA 1 m ³ (kg)	CANTIDADES PARA 1 m ³ (%)	BOTES DE 19 LITROS PARA 1 m ³	PARA 1 BULTO DE CEMENTO
CEMENTO	416.67	0.132	8 BULTOS	50.00 1.0 BULTO
AGUA	200.00	0.200	11 BOTES	24.00 1.3 BOTES
ARENA	784.76	0.304	24 BOTES	94.17 2.9 BOTES
GRAVA	985.23	0.364	29 BOTES	118.23 3.5 BOTES

Fuente: Elaboración propia.

4.3 GEOMALLA

De acuerdo con la clasificación que utilizan algunos de los proveedores de geomallas convencionales, la fabricada y empleada en esta investigación se trata de una geomalla biaxial debido a que las costillas o tiras longitudinales y transversales son de un mismo ancho promedio (1.6 cm) y se encuentran colocadas de manera perpendicular, esto además permitió que en el espaciamiento entre cada costilla se pudieran acomodar los agregados, generando una mayor resistencia mecánica al deslizamiento de la geomalla con el concreto hidráulico. Durante a fabricación de la geomalla de PET, se observó que luego de cortarse las botellas en tiras, éstas tendían a recuperar la forma cilíndrica de la botella, generándose una curvatura longitudinal en la geomalla una vez terminada, así como bordes irregulares en las tiras con una forma ondulada y no recta como se esperaba. Esto ayudó de cierta manera para que la geomalla tuviera una mayor resistencia al deslizamiento con el concreto y se generara una mayor trabazón entre los agregados y la geomalla. En la Figura 4.3 se muestra la comparación entre la geomalla esperada y la obtenida. También se observó que, durante el vaciado de las vigas, una vez colocada la geomalla a la altura establecida, el mismo concreto ayuda a mantener en la posición deseada a la geomalla, por lo que ésta deja de tratar de recuperar la forma cilíndrica de las botellas.

Tabla 4. 4 Propiedades físicas de la geomalla biaxial de PET fabricada.

Característica	Descripción	Unidad
Largo de la geomalla	60	cm
Ancho de la geomalla	15	cm
Tamaño de la abertura SL	8.13	cm
Tamaño de la abertura ST	5.10	cm
Ancho promedio de la costilla	1.6	cm
Forma de la costilla	Rectangular	-
Forma de las aberturas	Rectangular	-

Nota: SL = sentido longitudinal; ST = sentido transversal

Fuente: Elaboración propia.

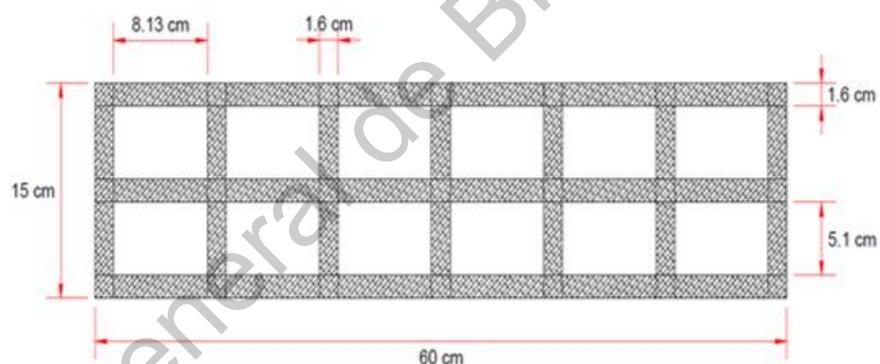


Figura 4. 3. Comparación de la geomalla esperada (arriba) con la geomalla obtenida (abajo). Obsérvese la ondulación y curvatura de las tiras tratando de recuperar la forma cilíndrica de la botella.

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que, durante la colocación de la geomalla biaxial de PET dentro del concreto fresco, este no tuvo variaciones en su consistencia ni manejabilidad debido a la propiedad del PET de baja a nula absorción de agua.

4.4 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

A partir del diseño de mezcla realizado, el concreto alcanzó e incluso superó la resistencia a flexión a edad final de diseño (28 días). Las 3 muestras adicionales se realizaron replicando el proporcionamiento del diseño base. Luego del ensaye a flexión de la muestra base, se observó que, la grieta se presentó dentro del tercio medio del claro de la viga, así como una falla frágil en el concreto, haciendo que la viga se partiera por la mitad y no se mantuviera sobre los apoyos que la sostenían. La Figura 4.4 muestra la ubicación y la falla presentada en la muestra base y en una de las reforzadas con geomalla de PET.



Figura 4.4. Ensaye de muestra base (izquierda) y una de las reforzadas con geomalla de PET (derecha).

Fuente: Elaboración propia

Por el contrario, las vigas reforzadas con la geomalla de PET no solamente incrementaron su resistencia a la flexión, sino que la geomalla evitó que la grieta iniciada en la parte inferior de la viga se propagara con la misma intensidad hacia la parte superior, generando una falla dúctil y permitiendo que la viga se mantuviera sobre los apoyos en una sola pieza.

Después del ensaye de las vigas reforzadas con una geomalla de PET y colocadas en el primer tercio de altura, a edad final de 28 días, se observó un incremento que va del 11 al 18 % en la resistencia a la flexión, respecto al concreto base. En la Tabla 4.4 se observa un resumen de la evolución de la resistencia de la muestra base, así como de las tres muestras reforzadas. El símbolo “ Δ ” hace referencia al incremento de la resistencia a flexión de cada muestra reforzada.

Tabla 4. 5. Resumen de los resultados de los ensayos a flexión.

Edad (días)	Muestra			
	Base MR (kg/cm ²)	No. 1 MR (kg/cm ²)	No. 2 MR (kg/cm ²)	No. 3 MR (kg/cm ²)
7	28.5	30.0	33.7	31.7
14	35.9	40.5	43.1	39.4
28	43.0	49.7	50.8	47.7
Δ	-	16%	18%	11%

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.5 se observa que todas las muestras de concreto tienen una evolución similar, tanto la muestra base como las tres reforzadas con geomalla de PET, correspondientes a la evolución normal de un concreto hidráulico, únicamente diferenciándose por el aporte de la geomalla de PET a la resistencia a la flexión, siendo notoria desde la (Subramanian, 2000) primera edad de ensaye (7 días). Además, se resume la evolución de la resistencia a la flexión de todas las muestras, tanto la de control (línea continua) como las que fueron reforzadas con la geomalla de PET (líneas punteadas) pudiendo observar que todas superan al concreto que no cuenta con refuerzo. El incremento máximo es del 18%, alcanzando un 50.8 kg/cm² de módulo de rotura, valor suficiente para considerarse un concreto de alta resistencia.

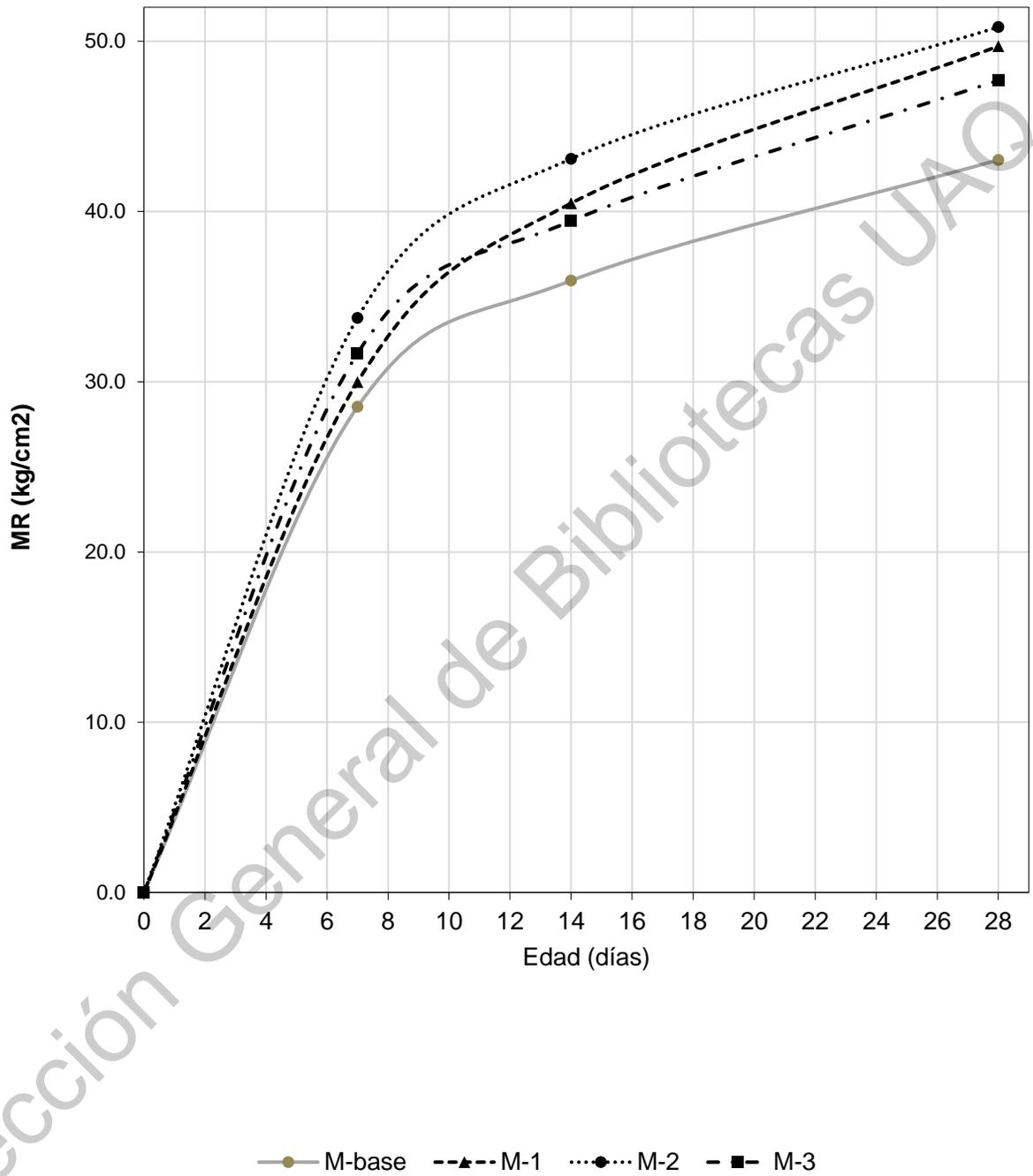


Figura 4. 5. Evolución de la resistencia a la flexión (MR) de las cuatro mezclas a edad final de 28 días.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla siguiente se presenta un resumen estadístico simple de las resistencias a la flexión de las diferentes edades de ensaye. En ella se pueden observar valores de desviación estándar muy similares de entre 1.3 y 1.5 kg/cm², lo cual indica una relativa baja dispersión de los datos si se toma en cuenta que los pavimentos rígidos se diseñan usualmente en un rango desde 32 hasta 50 kg/cm², para esta investigación se diseñó a 42 kg/cm². Los bajos coeficientes de variación confirman lo observado en los resultados de las desviaciones estándar, teniendo como menor variación un 2.6% y la mayor de 4.8%.

Tabla 4. 6. Estadístico resistencia a flexión para las diferentes edades de ensaye

Edad (días)	Muestra (kg/cm ²)			Media (x)	Desv. Estándar (σ)	Coef. Variación (CV)
	No. 1	No. 2	No. 3			
7	30.0	33.7	31.7	31.8	1.5	0.048
14	40.5	43.1	39.4	41.0	1.5	0.037
28	49.7	50.8	47.7	49.4	1.3	0.026

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se realizó un segundo análisis estadístico de acuerdo con la normativa vigente M.CAL.1.03.03 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) con la finalidad de verificar los resultados mediante las cartas de control de medias y desviaciones estándar para cada una de las muestras reforzadas con geomalla de PET a 28 días, los resultados son los siguientes.

Tabla 4. 7. Parámetros estadísticos de la resistencia a la flexión a 28 días

Muestra N° (n)	MR a 28 días (kg/cm ²)		Media de muestra	Desv. Est. de la muestra
	Prueba N°			
	1	2		
1	50.5	48.9	49.7	0.78
2	51.3	50.4	50.8	0.47
3	46.8	48.6	47.7	0.94
Promedio de las medias			49.4	-
Promedio de las desviaciones estándar			-	0.73

Fuente: Elaboración propia.

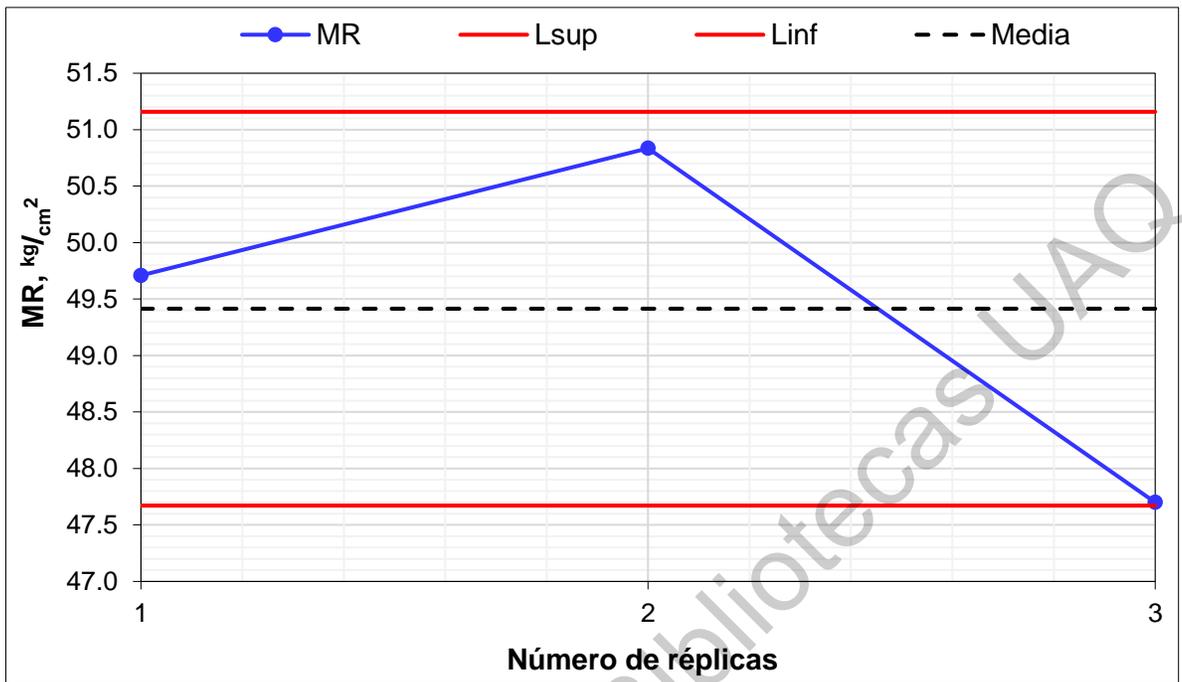


Figura 4. 6. Carta de medias estándar
Fuente: Elaboración propia.

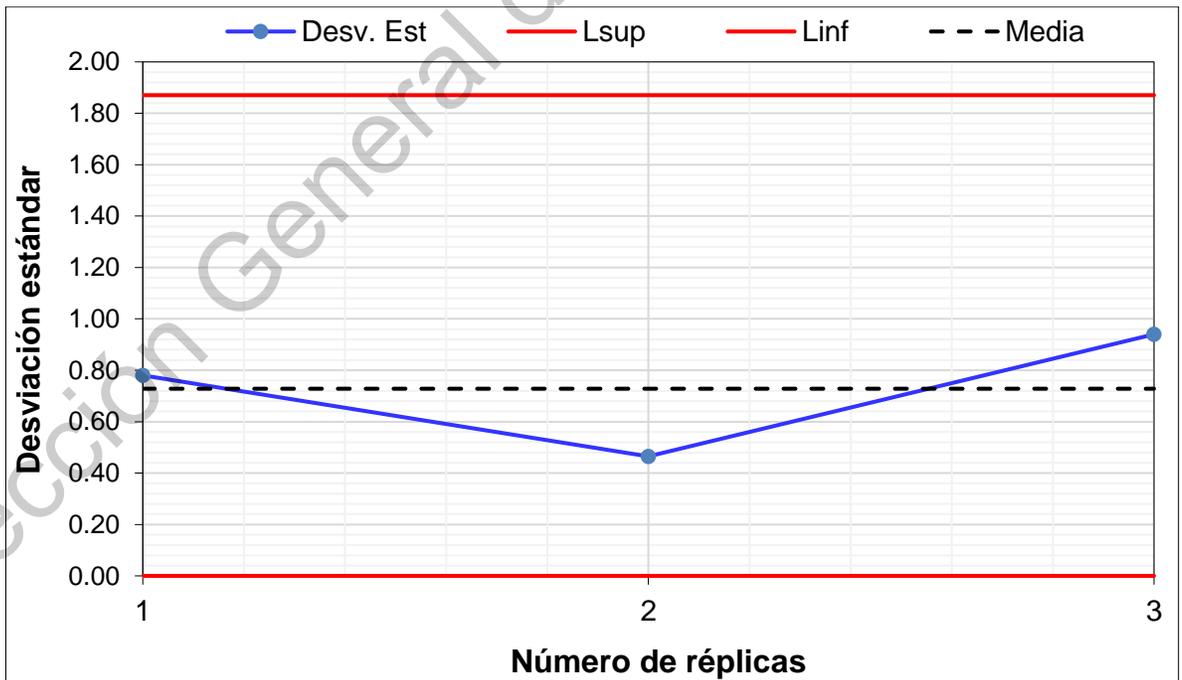


Figura 4. 7. Carta de desviaciones estándar
Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados de la resistencia a flexión obtenidos a edad final de 28 días de las 3 muestras reforzadas con la geomalla de PET, sus promedios y su desviación estándar, se calcularon los límites estadísticos y la media de las resistencias a la flexión (MR) y de las desviaciones estándar, tomando ciertas consideraciones en el análisis, tales como un nivel de confianza del 99.7% debido a un adecuado control en los procesos de elaboración y ensaye de los especímenes, reduciendo la posibilidad de variaciones por causas aleatorias.

Por último, para reforzar esta investigación, se realizó un análisis teórico mediante los métodos de análisis matricial y de elementos finitos que contempla el software SAP2000. Para el concreto patrón se alimentó al software con los parámetros usuales del concreto empleado: f_c de 350 kg/cm², masa volumétrica (γ) de 2,400 kg/m³, módulo elástico E de 300,000 kg/cm², módulo de Poisson (U) de 0.2, mientras que el resto de los parámetros fueron correlacionados por el software.

Material Property Data	
General Data	
Material Name and Display Color	Concreginald [Color Swatch]
Material Type	Concrete
Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	
Weight per Unit Volume	2.400E-03
Mass per Unit Volume	2.447E-06
Units	
	Kgf, cm, C
Isotropic Property Data	
Modulus of Elasticity, E	300000
Poisson's Ratio, U	0.2
Coefficient of Thermal Expansion, A	9.900E-06
Shear Modulus, G	125000
Other Properties for Concrete Materials	
Specified Concrete Compressive Strength, f'c	350
<input checked="" type="checkbox"/> Lightweight Concrete	
Shear Strength Reduction Factor	
<input type="checkbox"/> Switch To Advanced Property Display	
OK Cancel	

Figura 4. 8. Parámetros de la viga de concreto base.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 4. 9. Diagramas de carga, cortante, momento y deflexión de la viga de concreto base.

Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 4.8 y 4.9 se observa que se replicaron las vigas de concreto elaboradas para la muestra patrón, respetando dimensiones y características de un concreto simple. Debido a que el software no está diseñado para trabajar con materiales anisotrópicos la deflexión obtenida fue empleada para igualar esta con la del concreto reforzado con la geomalla de PET. Durante el análisis se aplicaron las mismas cargas que resistieron las vigas en laboratorio, de tal modo que la variable dependiente fuese el módulo de elasticidad (E).

Figura 4. 10. Parámetros de la viga de concreto reforzada con geomalla de PET.
Fuente: Elaboración propia.

Mediante iteraciones, se logró igualar la deflexión de ambas vigas y se observó que el módulo de elasticidad tuvo un incremento prácticamente proporcional (16.7%) a la resistencia de la viga reforzada con geomalla de PET. Cabe señalar que el módulo de elasticidad obtenido para las vigas de concreto reforzado no corresponde directamente al concreto o a la geomalla de PET, sino que es la resultante de ambos materiales trabajando en conjunto.



Figura 4. 11. Diagramas de carga, cortante, momento y deflexión de la viga de concreto reforzado con geomalla de PET.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados, se observa que para un concreto diseñado con un f'_c de 350 kg/cm^2 y reforzado con una geomalla de PET se logra alcanzar un incremento de la resistencia del 15% en promedio, tanto para compresión como para flexión y este mismo incremento es proporcional al módulo de elasticidad. Este modelo teórico confirma lo observado mediante los ensayos de laboratorio y es congruente con los valores de módulos de elasticidad para las diferentes resistencias del concreto.

5. CONCLUSIONES

Los resultados son contundentes al observarse un incremento promedio del 15% y un incremento máximo de hasta un 18%. Para carreteras de altas especificaciones es usual diseñar concretos con un $MR = 48 \text{ kg/cm}^2$ por lo que estos resultados son alentadores mostrando que los pavimentos de concreto hidráulico reforzados con una geomalla de PET podrán resistir de mejor manera a las sobrecargas con las que circulan los vehículos pesados en las carreteras de todo el país. Además, se observa cierta relación en el incremento de la resistencia a la flexión que se tuvo con la geomalla biaxial de PET (incremento del 15%) contra lo reportado por Meski y Chehab en 2014 para una geomalla biaxial de polipropileno (incremento del 12.3%). Adicionalmente de obtener resultados satisfactorios con el incremento de la resistencia a la flexión, mediante la reutilización de tales desechos sólidos, se contribuye con el medio ambiente evitando que el destino final de los embaces que no son reciclados sea un vertedero.

Basándose en los resultados de las pruebas de flexión de vigas presentadas en este documento, los beneficios del uso de una geomalla biaxial de PET como refuerzo estructural en pavimentos rígidos pueden resumirse de la siguiente manera:

1. El ensaye se detuvo hasta la falla del concreto, no hasta hacer fallar la geomalla de PET, por lo que se pudieran alcanzar resistencias aún mayores a las aquí reportadas por el aporte de la geomalla.
2. El refuerzo con la geomalla de PET proporciona un comportamiento dúctil después de la rotura del concreto, así como una mayor resistencia a la flexión y una deflexión considerable, permitiendo que las vigas se mantuvieran en su posición original sobre los apoyos.
3. Existe una clara correlación entre la resistencia del concreto, el módulo de elasticidad, las propiedades de tensión de la geomalla y la propagación de la grieta hacia la parte superior de la viga luego de que fallara el concreto.
4. Los resultados se encuentran dentro de los límites estadísticos de acuerdo con el número de muestras realizadas y con lo establecido en normativas

convencionales, la dispersión de los datos es relativamente baja y se comprueba con las desviaciones estándar y coeficientes de variación, basándonos en el rango que se utiliza para el diseño de concreto para pavimentos rígidos.

5. La comparación del modelo teórico con lo observado en laboratorio es congruente, con esto y mediante el análisis estadístico, se puede inferir que los resultados son confiables.

Los objetivos siguientes de esta investigación, como trabajos futuros, será la utilización de la geomalla biaxial de PET en un pavimento rígido en proceso de construcción para así conocer las posibles problemáticas que se pudieran generar durante el proceso en obra, así como poder ser evaluada dentro del pavimento rígido en condiciones de servicio. La producción en serie podrá incluirse como área de oportunidad pues durante esta investigación se realizaron las geomallas de modo manual, por lo que el proceso de elaboración tiene en el tiempo de fabricación mucho por ganar. Un método o procedimiento para la colocación de la geomalla que asegure un mayor pretensado, se infiere que modificará el comportamiento de los elementos a flexión y que se podrá alcanzar un módulo de rotura (MR) mayor a lo observado durante esta investigación.

6. REFERENCIAS

- Abdessemed, M., Kenai, S., & Bail, A. (2015). Experimental and Numerical Analysis of the Behavior of an Airport Pavement Reinforced by Geogrids. *Construction and Building Material, ELSEVIER*, vol. 94, pp. 547 - 554.
- Andrady, A. L., & Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 364, pp. 1977 - 1984.
- ANPRAC. (2008). La Industria de Refrescos y Aguas Carbonatadas en 2008. *Asociación Nacional de Productores de Refrescos y Aguas Carbonatadas, A.C. ANPRAC, México.*
- Arteaga Capistrán, M. I. (2018). Optimización Geométrica y Acomodo de Fibras de PET Reciclado para Mejorar la Resistencia a la Flexión en Morteros - TESIS. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Baamonde Roca, A., Pérez Pérez, I., & Herrador, M. F. (2011). Geosintéticos en carreteras: Planteamientos para su aplicación en las capas de firme. *Universidad de Coruña, E. T. S. I. Caminos*, pp. 1 - 9.
- Baldenebro López, F. J., Herrera Ramírez, J. M., & Castorena González, J. H. (2015, Febrero). Estudio numérico-experimental de fibras de PET y su comportamiento en una matriz de concreto. Chihuahua, Chihuahua, México: Centro de Investigación en Materiales Asociados, S.C.
- Ballester Muñoz, F., Castro Fresno, D., & Gil Oceja, M. (2000). Definición, función y clasificación de los geotextiles. *Arte y Cemento, Departamento de Transporte y Tecnología de Proyectos y Procesos, Universidad de Cantabria*, pp. 2 - 9.
- Barry R., C., Ph., D., & P., E. (2010). Geogrids in Roadway and Pavement Systems. *NAUE GmbH & Co. KG, and Global Synthetics Pty Ltd*, pp. 1 - 114.

- Botero Jaramillo, E., Muñoz, L., Ossa, A., & Romo, M. (2014). Comportamiento Mecánico del Polietileno Tereftalato (PET) y sus aplicaciones geotécnicas. *Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 70, pp. 207 - 219.
- Camargo Pérez, N. R., & Higuera Sandoval, C. H. (2016). Concrete Hydraulic Modified with Silica Obtained of the Rice Husk. *Ciencia en Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, pp. 91 - 109.
- Correia, N., & Zornberg, J. (2018). Strain Distribution Along Geogrid-Reinforced Asphalt Overlays Under Traffic Loading. *Geotextiles and Geomembranes, ELSEVIER*, vol. 46, pp. 111 - 120.
- Cristán Frías, A., Ize, I., & Gavilán, A. (2003). La Situación de los Envases de Plástico en México. *Gaceta Ecológica*, no. 69, pp. 67 - 82.
- ECOCE. (2018). *Cifras y Estadísticas*. Retrieved from ECOCE: con acceso en: <http://ecoce.mx/cifras.php>, Recuperado el 09 de marzo de 2018
- El Meski, F., D., P., P.E., & Chehab, G. (2014). Flexure Behavior of Concrete Beams Reinforced with Different Types of Geogrids. *American Society of Civil Engineers*, vol. 26. pp. 1 - 8.
- Espinosa Arreola, J., & Alarcón Ibarra, J. (2012, Julio). Pavimentos Rígidos vs Flexibles:Cuál es mejor. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil , Morelia, Michoacán , México: Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres.
- Europe, P., EUPC, EPRO, & EUPR. (2008). The Compelling Facts About Plastics an Analysis of Plastics Production, Demand and Recovery for 2006 un Europe. *Plastics The Material for the 21 st Century*.
- F. Zollo, R. (1997). Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development. *Cement and Concrete Composites*, vol. 19, pp. 107 - 122.

- Ferro Nieto, A., Toledo Arguelles, A., & Cadalso Basadre, J. (Recuperado el 19 de febrero de 2018). *El envase de polietereftalato; su impacto medio ambiental y los métodos para su reciclado*. Retrieved from Universitaria: <http://bdatos.usantotomas.edu.con:205/lib/bibliotecaustasp/reader.action?docID=10268759>
- Foti, D. (2011). Preliminary Analysis of Concrete Reinforced with Waste Bottles PET Fibers. *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 1906 - 1915.
- Fournier, P. (2006). Arqueología de los Caminos Prehispánicos y Coloniales. *Arqueología Mexicana*, XIV (81), pp. 26 - 31.
- Giroud, J. (1984). Geotextiles and Geomembranes. *Geotextiles and Geomembranes, England*, pp. 5 - 40.
- Gómez Serrato, J. (2016). Diagnóstico del Impacto del Plástico - Botellas sobre el Medio Ambiente: Un Estado del Arte - Tesis. Facatativá, Cundinamarca, Universidad Santo Tomás.
- Gómez, J. M., & García, T. (2002). Transporte y Rueda en la Península Ibérica Prerromana. *Caminería Hispánica*, vol. 2, pp. 811 - 824.
- Góngora Pérez, J. P. (2014). La Industria del Plástico en México y el Mundo. *Comercio Exterior*, vol. 64, pp. 6 - 9.
- Gutiérrez Avedoy, V., Ramírez Hernández, I. F., Encarnación Aguilar, G., & Medina Arévalo, A. (2012). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos. SEMARNAT, pp. 8 - 49.
- Gutiérrez Hernández, J. L., Soria Anguiano, V. J., & Dorado Pineda, M. L. (2017). Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional. *Análisis estadístico de la Información recopilada en las estaciones instaladas en 2016*. Sanfandila, Querétaro: Documento Técnico No. 71, pp. 23 - 82.

- H. Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design*. United States of America: Ed. Pearson Prentice Hall, Second Edition.
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics Recycling: Challenges and Opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 364, pp. 2115 - 2126.
- Iberoamérica, C. d. (2002). *Cátalogo de Deterioros de Pavimentos Rígidos*. vol. 12: Dirección Nacional de Vialidad de la República de Chile.
- IMT. (1991). *Cátalogo de Deterioros en Pavimentos Flexibles de Carreteras Mexicanas*. Instituto Mexicano del Transporte y Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Publicación Técnica No. 21, pp. 1 - 52.
- IMT. (2015, Diciembre). *Red Nacional de Caminos*. Retrieved from Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte: <https://www.gob.mx/imt/acciones-y-programas/red-nacional-de-caminos>, Recuperado 9/03/2018
- IMT, & SCT, I. &. (2015). *Instituto Mexicano del Transporte*. Retrieved from Documento Técnico Descriptivo: con acceso en: https://www.imt.mx/images/files/USIG/rnc/Documentp_Tecnico-pdf. Recuperado el 12 de febrero de 2019
- INECC. (n.d.). Estudio de Análisis de Ciclo Vida (ACV) del Manejo de Envases de Bebidas de Polietilen Tereftalato (PET) en la Fse de Pos-Consumo. *Cooperación Alemanda al Desarrollo, GIZ*, pp. 4 - 57.
- Itani, H., Saad, G., & Chehab, G. (2016). The Use of Geogrid Reinforcement for Enhancing the Performance of Concrete Overlays: An Experimental and Numerical Assessment. *Construction and Building Materials*, vol. 124, pp. 826 - 837.

- K, R., & Manoharan, A. (2017). Flexure Behaviour of Concrete Beam Reinforced with Biaxial Geogrid. *International Journal of Engineering Research and General Science*, vol. 5, pp. 72 - 83.
- Kabir, R., & E. Hiller, J. (2019). Numerical Analyses of Rigid and Flexible Pavements Responses Under Heavy Vehicles Loading. *Road Materials and Pavement Design*, Taylor & Francis Group, pp. 1 - 25.
- Kelechi, U., & Okeke, O. (2018). Geotextiles and Geomembranes: Properties, Production and Engineering Applications. *International Journal of Advanced Academic Research*, vol. 4, pp. 1 - 16.
- Komatsu, T., Kikuta, H., Tuji, Y., & Muramatsu, E. (1998). Durability Assessment of Geogrid-Reinforced Asphalt Concrete. *Geotextiles and Geomembranes*, ELSEVIER, vo. 16, pp. 257 - 271.
- Lopes Pereira, E., Oliveira Junior, A. L., & Gomes Fineza, A. (2017). Optimization of Mechanical Properties in Concrete Reinforced with Fibers from Solid Urban Wastes (PET bottles) for the Production of Ecological Concrete. *Construction and Building Materials*, ELSEVIER, vol. 149, pp. 837 - 848.
- M.MMP.1.04. (2003). Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales. *Contenido de Agua*. SCT.
- M.MMP.1.05. (2018). Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales. *Densidades Relativas y Absorción* . SCT.
- M.MMP.2.02.020. (2018). Método de Muestreo y Prueba de Materiales. *Finura del Cemento por el Método del Tamiz*. SCT.
- M.MMP.2.02.023. (2018). Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales. *Masa Volumétrica de los Agregados Pétreos*. SCT.

- M.MMP.2.02.032. (2018). Método de Muestreo y Prueba de Materiales. *Resistencia a la Degradación del Agregado Grueso mediante la Máquina de Los Ángeles*. SCT.
- M.MMP.2.02.056. (2006). Método de Muestreo y Prueba de Materiales. *Revenimiento del Concreto Fresco*. SCT.
- Martínez Barrera, G., Martínez López, M., & Martínez Cruz, E. (2013). Concreto Polimérico Reforzado con Fibras de Luffa. *Información Tecnológica*, vol. 24, pp. 67 - 74.
- Martínez Cruz, E., & Martínez Barrera, G. (2016). Desarrollo y Caracterización de Concreto Polimérico Modificado con Fibras Recicladas: Efecto de la Radiación Gamma. Universidad Autónoma del Estado de México - TESIS, pp. 11 - 68.
- Martínez Nieto, A. F. (2007). *Diseño de Mezcla de Concreto: Método ACI*.
- Mendoza, C. J., Aire, C., & Dávila, P. (2011). Influencia de las Fibras de Polipropileno en las Propiedades del Concreto en Estados Plástico y Endurecido. *Concreto y Cemento*, vol. 2, pp. 35 - 47.
- Miller S, J., & Y. Bellinger, W. (2014). Distress Identification Manual for Long-Term Pavement Performance Program. *Office of Infrastructure Research and Development Federal Highway Administration*, pp. 3 - 146.
- N.CMT.2.02.002. (2019). Características de los Materiales. *Calidad de Agregados Pétreos para Concreto Hidráulico*. SCT.
- NMX-C-159-ONNCCE. (2016). Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo. Industria de la Construcción, ONNCCE.
- NMX-C-303-ONNCCE. (2010). Cementos Hidráulicos. *Determinación de la Resistencia a la Flexión usando una Viga Simple con Carga en el Centro del Claro*. Industria de la Construcción, ONNCCE.

- Pelisser, F., Montego, O., Gleize, J., & Ramos, H. (2012). Mechanical Properties of Recycled PET Fibers in Concrete. *Material Research*, vol. 4, pp. 1 - 8.
- Perdomo M., G. (2002). Plásticos y Medio Ambiente. *Iberoamericana Polímeros*, vol. 3 no. 2, pp. 1 - 13.
- Rawal, A., Shah, T., & Anand, S. (2013). Geotextiles: Production, Properties and Performance. *Textile Progress*, vol. 42-3, pp. 181 - 226.
- Rivera L., G. A. (2000). *Resistencia del Concreto*. cap. 6, pp. 121 - 151.
- Ross, H. (2006). Rutas y Caminos de los Mexicas. *Arqueología Mexicana*, XIV (81), pp. 54 - 59.
- S. Cleveland, G., W. Button, J., & L. Lytton, R. (2002). Geosynthetics in Flexible and Rigid Pavement Overlay Systems to Reduce Reflection Cracking. *Texas Transportation Institute*, vol. 1777, pp. 1 - 298.
- S.A., A., Hedad, A., Bambridge, E., & Hadi, M. N. (2017). Influence of Geogrid on the Drying Shrinkage Performance of Concrete Pavements. *Construction and Building Materials ELSEVIER*, vol. 146, pp. 165 - 174.
- Saikia, N., & Brito, J. (2012). Waste Polyethylene Terephthalate as an Aggregate in Concrete. *Materials Research*, vol. 27, págs. 10.
- SCT. (1991). *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras*. Cuarta Reimpresión.
- SCT. (2017). Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2. *Sobre el Peso y Dimensiones Máximas con los que Pueden Circular los Vehículos de Autotransporte que Transitan en las Vías Generales de Comunicación de Jurisdicción Federal*.
- SCT. (n.d.). *Cátalogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las Carreteras de la República Mexicana*. Dirección General de Servicios Técnicos.

- SEMARNAT. (2017). *Residuos Sólidos Urbanos (RSU)*. Retrieved from SEMARNAT: Con acceso en: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu>, Recuperado el 09 de marzo de 2018
- Shobana, S., & Yalamesh, G. (2015). Experimental Study of Concrete Beams Reinforced with Uniaxial and Biaxial Geogrids. *International Journal of ChemTech Research*, vol. 8, No. 3, pp 1290 - 1295.
- Subramanian, P. (2000). Plastics recycling and waste management in the US. *Resour Conserv Recycl*, vol. 28, no. 3 - 4, pp. 253 - 263.
- Tang, X., Chehab, G., & Kim, S. (2008). Laboratory Study of Geogrid Reinforcement in Portland Cement Concrete. *International Conference of Cracking in Pavements*, Chicago, Illinois, pp. 769 - 778.
- Tang, X., R. Chehab, G., & Palomino, A. (2008). Evaluation of Geogrids for Stabilising Weak Pavement Subgrade. *International Journal of Pavement Engineering*, Taylor & Francis Group, vol. 9, No.6, pp. 413 - 429.
- Vázquez Morillas, A., Espinosa Valdemar, R. M., Beltrán Villavicencio, M., & Velasco Pérez, M. (n.d.). El Reciclaje de los Plásticos. Universidad Autónoma Metropolitana, ANIPAC.
- Venkateswarlu, H., Unnawal, K., & Hegde, A. (2018). Laboratory and Numerical Investigation of Machine Foundations Reinforced with Geogrids and Geocells. *Geotextiles and Geomembranes*, ELSEVIER, vol. 46, pp. 882 - 896.
- Ziegler, M. (2017). Application of Geogrid Reinforced Constructions: History, Recent and Future Developments. *Modern Building Materials, Structures and Techniques*, ELSEVIER, vol. 172, pp. 42 - 51.