



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto hidráulico mediante la aplicación de homopolímeros reciclados para su aplicación como pavimento rígido

Trabajo escrito

Opción de titulación:
Tesis

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

Presenta

Ing. José David López Muro

Dirigido por:

Dra. Teresa López Lara

Co-dirigido por:

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Dra. Teresa López Lara
Presidente

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Secretario

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca
Vocal

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Suplente

Dr. Francisco Javier García Rodríguez
Suplente

Dirección General de Bibliotecas UAQ

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal determinar las propiedades mecánicas del mortero y concreto polimérico hecho con resinas proveniente de materiales reciclados. Botellas post consumo de polietileno tereftalato (PET) fueron procesadas para ser recicladas químicamente vía glicolisis para producir la resina bis-2-hidroxietil tereftalato (BHET). Se empleó etilenglicol y acetato de zinc para llevar a cabo la reacción en diferentes proporciones con la intención de conocer el mejor rendimiento. La resina se caracterizó por espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC). Una vez analizada se agregó en muestras cúbicas de mortero en cantidades del 3,6,9,12 y 20 por ciento de acuerdo con el peso del cemento utilizado en la mezcla. Los especímenes fueron ensayados a compresión simple a la edad de 28 días para hacer la comparación con la misma mezcla sin resina y ver las variantes en el resultado. De los diferentes ensayos, se obtuvo que el porcentaje de BHET que brinda la mayor resistencia a la compresión es del 3%, del cual se evaluó su resistencia a 7 y 14 días para ver su evolución y posteriormente replicar el experimento en vigas de concreto y obtener el módulo de ruptura (MR) del concreto polimérico. Se analizó la mejora que otorga la resina y su potencial para ser utilizado como material de pavimentación.

Palabras clave: reciclaje químico, glicolisis, PET, mortero polimérico, concreto polimérico, resistencia a la compresión, módulo de ruptura, pavimento.

SUMMARY

The main objective of this research work was to determine the mechanical properties of the mortar and polymer concrete made with resins from recycled materials. Post-consumption bottles of polyethylene terephthalate (PET) were treated to be chemically recycled via glycolysis to produce the resin bis-2-hydroxyethylterephthalate (BHET). Ethylene glycol and zinc acetate were used to carry out the reaction in different proportions in order to know the best performance. The resin was characterized by infrared spectrometry with Fourier transform (FTIR), thermogravimetric analysis (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC). Once analyzed was added in cubic mortar specimens in quantities of 3,6,9,12 and 20 percent according to the weight of the cement used in the mixture. The specimens were tested under simple compression at the age of 28 days in order to make the comparison with the same mixture without resin and see the variants in the result. From the different assays, percentage of BHET that gives the greatest resistance to compression is 3%, of which its resistance was evaluated at 7 and 14 days to see its evolution to then replicate the experiment in concrete beams and obtain the modulus of rupture (MR) of the polymeric concrete. The improvement that the resin grants and its potential to be used as paving material was analyzed.

Key words: chemical recycling, glycolysis, PET, polymeric mortar, polymeric concrete, compressive strength, modulus of rupture, pavement.

DEDICATORIA

A mis padres, Griselda del Carmen Muro Mares y José Antonio López Becerra, por ayudarme a alcanzar un logro más en la vida.

A mi hermano, Antonio López Muro por su apoyo durante todos estos años.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Teresa López Lara por haberme brindado su conocimiento, disposición y sobre todo la confianza para trabajar bajo su dirección a lo largo este periodo.

Al Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca por sus atinadas observaciones que se vieron reflejadas en la redacción y estructuración del presente documento.

A mis sinodales, el Dr. Francisco Javier García Rodríguez, el Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza y el Dr. Jaime Moisés Horta Rangel por sus valiosas aportaciones técnicas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el soporte brindado a través del proyecto del Laboratorio Nacional de Investigaciones en Tecnología del Frío (LaNITeF) y por brindarme el apoyo para poder concluir con los estudios de posgrado.

A mis compañeros de generación, en especial a Israel González y Alberto Cortés por compartir su experiencia y otorgarme su invaluable amistad en este periodo.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	2
1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.4 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 PAVIMENTOS.....	5
2.2 CONCRETOS POLIMÉRICOS	16
2.3 EL PLÁSTICO Y SU RECICLAJE	39
3. METODOLOGÍA	40
3.1 DIAGRAMA DE LA METODOLOGÍA	41
3.2 DEPOLIMERIZACIÓN QUÍMICA.....	42
3.3 ELECCIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS Y CARACTERIZACIÓN	44
3.4 DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO Y MORTERO CON DIFERENTES PROPORCIONES.....	45
3.5 ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS MEZCLAS	45
3.6 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	48
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	49
4.2 DEPOLIMERIZACIÓN QUÍMICA.....	62
4.3 DISEÑO DE MEZCLAS CON DIFERENTES PROPORCIONES.....	73
4.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MORTERO POLIMÉRICO.....	76
4.5 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO POLIMÉRICO.....	79
5. CONCLUSIONES	82
6. REFERENCIAS	85
7. APÉNDICE	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características fundamentales del pavimento flexible.....	7
Tabla 2. Combinaciones de las mezclas de diseño para concretos poliméricos con resinas de furano.....	18
Tabla 3. Resultados a la compresión simple	19
Tabla 4. Máximos experimentales óptimos y predichos a la compresión simple...	20
Tabla 5. Número de ensayos y variaciones entre las longitudes de las fibras de PET y su contenido en porcentajes de volumen para cada mezcla de concreto hidráulico	23
Tabla 6. Valores obtenidos en MPa por los ensayos de compresión (Cn) y de tensión (Tn) con sus respectivos coeficientes de variación (CV) entre las 6 repeticiones elaboradas para cada ensayo	23
Tabla 7. Valores obtenidos de compresión y tensión para una mezcla de concreto hidráulico común y una modificada con fibras de PET con longitud y porcentaje de volumen óptimos.	24
Tabla 8. Resistencia a la tensión encontrada al hacer sustitución de arena por agregados finos producto de la molienda de tuberías de PVC.....	28
Tabla 9. Resistencia a la tensión encontrada al añadir fibras de monofilamento de polipropileno (P1) y fibras cortadas de polipropileno (P2) al concreto hidráulico ..	29
Tabla 10. Resultados obtenidos a la flexión por diversas investigaciones relacionadas con concretos poliméricos.....	33
Tabla 11. Módulos de ruptura sugeridos de acuerdo con el tipo de vialidad.....	46

Tabla 12. Concentrado de la cantidad de pruebas y las repeticiones a realizar para cada una de estas	48
Tabla 13. Granulometría obtenida para la grava 1.	51
Tabla 14. Granulometría obtenida para la grava 2.	52
Tabla 15. Granulometría obtenida para la arena.....	52
Tabla 16. Pesos volumétricos obtenidos para los agregados gruesos y finos muestreados.....	56
Tabla 17. Resultados de densidad y absorción obtenidos para los materiales muestreados.....	58
Tabla 18. Resultados obtenidos para la obtención del límite líquido.....	61
Tabla 19. Resumen de resultados obtenidos para límite líquido, límite plástico y contracción lineal de los finos encontrados en la arena.	62
Tabla 20. Conjunto de experimentos a pequeña escala realizados. PET 1 * se realizó sin catalizador.	66
Tabla 21. Bandas con modo vibracional asignado de un espectro FTIR de una muestra de PET	68
Tabla 22. Proporciones obtenidas para el diseño de la mezcla con $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$	74
Tabla 23. Proporciones obtenidas para el diseño de la mezcla de mortero hidráulico	75
Tabla 24. Valores de resistencia a la compresión obtenidos como respuesta al ensayo de compresión de mortero a diferentes contenidos de BHET a la edad de 28 días. (wo: sin sustitución de cemento; w: con sustitución de cemento).....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los diferentes tipos de pavimentos rígidos	11
Figura 2. Resultados y comparación de resistencias a compresión para diferentes mezclas de arena, látex y fibras	21
Figura 3. Esquema del módulo de ruptura descrito en la norma ASTM C78.....	31
Figura 4. Representación esquemática de la metodología.....	42
Figura 5. Reactivos en un estado de pureza de 99.9% a emplear para la glicolisis.	44
Figura 6. Muestreo en el banco de materiales pétreos “Las brujas”	49
Figura 7. Preparación del agregado grueso para la realización del análisis granulométrico.....	50
Figura 8. Cribado del agregado fino para la obtención de la curva granulométrica	51
Figura 9. Curva granulométrica obtenida para la grava 1	53
Figura 10. Curva granulométrica obtenida para la grava 2.....	53
Figura 11. Curva granulométrica obtenida para la arena	54
Figura 12. Cuarteo de la grava 1	55
Figura 13. Cuarteo de la arena.....	55
Figura 14. Obtención de la masa de la grava 2 para el cálculo del peso volumétrico	56

Figura 15. Determinación de la densidad de la arena	57
Figura 16. Arena es estado saturado y superficialmente seco para el cálculo de su absorción.....	58
Figura 17. Procedimiento para la obtención del equivalente de arena.....	59
Figura 18. Determinación del límite líquido por medio de la copa de Casagrande	60
Figura 19. Determinación de la contracción lineal.....	60
Figura 20. Gráfica y ecuación para la determinación del límite líquido.....	61
Figura 21. Limpieza de las botellas de PET.	63
Figura 22. De lado izquierdo se tiene el almacenamiento de desechos producidos por la preparación del PET. De lado derecho se tienen las botellas listas para ser introducidas al molino para su pulverización	64
Figura 23. Botella de PET reciclada y hojuelas obtenidas del proceso de molienda.	65
Figura 24. Espectro FTIR de escamas de botellas de PET postconsumo (azul) y BHET producto de despolimerización de PET (negro).....	67
Figura 25. Analizador térmico TGA/DSC Mettler Toledo.	69
Figura 26. Curvas calorimétricas obtenidas del análisis termogravimétrico. La línea en negro corresponde a las hojuelas de PET. La línea en azul corresponde al producto de la depolimerización.....	70
Figura 27. Curvas calorimétricas obtenidas del análisis de calorimetría con diferencial de barrido. La línea en negro corresponde a las hojuelas de PET. La línea en azul corresponde al producto de la depolimerización.....	71
Figura 28. Ensaye a compresión de mortero con resina de BHET	76

Figura 29. Variación de la resistencia a la compresión del mortero polimérico con diferentes porcentajes de BHET en la mezcla.....	77
Figura 30. Evolución en la resistencia a la compresión del mortero polimérico con 3% de BHET sin sustitución de cemento.....	78
Figura 31. Ensaye a flexión de concreto polimérico con 3% de BHET sin sustitución de cemento.....	79
Figura 32. Variación del módulo de ruptura del concreto hidráulico en comparación con el concreto polimérico con 3% de BHET empleado como aditivo.....	80
Figura 33. Prueba de revenimiento realizada en concreto polimérico con 3% de BHET como aditivo.....	81

Dirección General de Bibliotecas UAQ

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Los pavimentos rígidos son aquellos que fundamentalmente están constituidos por una losa de concreto hidráulico (Montejo, 1997). Olivera (1986) afirma: “El concreto hidráulico es un material pétreo artificial, elaborado al mezclar parte de agua y cemento Portland con arena y grava, en proporciones tales que se produzca la resistencia y la densidad deseadas”. El concreto hidráulico es el material de construcción más utilizado en todo el mundo gracias a su bajo costo, facilidad de aplicación y alta resistencia a la compresión de este (Muthukumar y Mohan, 2004). Sin embargo, este material también tiene inconvenientes tales como una alta contracción por secado, una mala resistencia química y una baja resistencia a la tensión, que acortan la esperanza de vida de las infraestructuras como pavimentos y pistas (Ahmed *et al.* 1988; Giussani y Mola, 2012). La vida útil de un pavimento de concreto hidráulico depende de muchos factores, incluyendo las propiedades mecánicas y reológicas del material, las cargas aplicadas, las condiciones ambientales y eventualmente la aplicación de sales de deshielo y las prácticas de mantenimiento (Giussani y Mola, 2012). Todos estos factores influyen en el desarrollo de grietas que reducen la capacidad de carga y durabilidad estructural, ya que permiten que el agua y otros agentes químicos pasen a través de la capa de cubierta (Ahmed *et al.* 1988; Frabizzio y Buch, 1999).

El comportamiento mecánico del concreto hidráulico ha sido mejorado por varios investigadores experimentando con diferentes curvas granulométricas (ACI, 2010), la cantidad de agua y cemento, contenido de aditivos, incluyendo varios tipos de fibras (Bonicelli *et al.* 2015 a; Bonicelli *et al.* 2015 b, Huang *et al.* 2010). Por otra parte, se tiene que diversas investigaciones han optado por añadir polímeros en

concretos destinados a diferentes tareas, con la intención de mejorar sus propiedades mecánicas. Tal es el caso de los concretos permeables en los cuales Huang *et al.* (2010) efectuaron una investigación para evaluar el desempeño de concretos permeables empleando látex de caucho de estireno butadieno y fibra de polipropileno de látex.

Así mismo en Pindado *et al.* (1999) se llevó a cabo un estudio sobre el comportamiento de fatiga de concretos porosos modificados con polímeros, empleando acrílico polimérico diluido en agua, obteniendo resultados positivos a la fatiga cuando el concreto era sometido a altos niveles de tensión a diferencia de los concretos que no contenían polímeros. Otras propiedades pueden ser aprovechadas de los concretos poliméricos. Los concretos poliméricos de base *epoxi* tienen un encogimiento de curado relativamente bajo. En general, los concretos de cemento Portland experimentan una contracción de secado a largo plazo durante el proceso de deshidratación (Mani *et al.* 1987). Los polímeros podrían de hecho tener la capacidad de mejorar el rendimiento mecánico, particularmente la resistencia a la flexión, sin reducir la capacidad de drenado y el contenido de vacíos. (Wong *et al.* 2007).

1.2 Justificación

El manejo de desperdicios plásticos requiere de un método especial para su reciclaje el cual sea redituable. Adnan *et al.* (2016) mencionan que es uno de los principales problemas ambientales en la actualidad. Chaukura *et al.* (2015) mencionan que el poliestireno residual plantea serios riesgos ambientales al ser lenta su desintegración natural, por lo que Kaya y Kar (2016) sustentan la necesidad de su reciclaje en términos económicos y ambientales.

Una alternativa a esto es el uso de polímeros en el concreto hidráulico, tema del cual diversas investigaciones se han desarrollado, obteniendo resultados positivos. En Jo *et al.* (2008) se afirma que el concreto con polímeros presenta mayor resistencia y durabilidad que el concreto hecho a base de cemento convencional. A su vez Ahn *et al.* (2016) sostienen que este material ha sido utilizado con éxito en el ámbito estructural debido a la rigidez que presenta. Así como se mejoran sus propiedades a compresión, en la investigación desarrollada por Pereira *et al.* (2017) se argumenta que la resistencia a la flexión se mejora considerablemente por medio de la adición de fibras obtenidas del PET.

Ahora bien, de acuerdo con Ziari *et al.* (2016) la resistencia a la flexión es el parámetro principal para el diseño de pavimentos rígidos, por lo que se infiere la necesidad de una investigación específica para aplicar el concreto polimérico a un pavimento. Como se menciona en Joo *et al.* (2008) y en Yeon *et al.* (2017) el concreto hecho a base de polímeros es utilizado para reparación de pavimentos existentes, lo cual expone la necesidad de evaluar el desempeño de un pavimento rígido elaborado completamente de concreto polimérico para determinar su comportamiento.

1.3 Descripción del problema

Problemas encontrados:

- Acumulación excesiva de desechos plásticos por un mal manejo de estos, lo cual causa problemas al medio ambiente.
- Baja resistencia a la flexión presentada por el concreto hidráulico.
- Fallas en el pavimento rígido por la carencia de esta propiedad mecánica.

El uso de plásticos es bastante común en la vida diaria por lo que ha generado una gran demanda de ellos, y con esto el manejo de sus desperdicios se ha convertido en un problema constante. El reciclaje es la mejor opción para el manejo de estos desechos visto desde una perspectiva ambiental, sin embargo, los procedimientos a emplear pueden ser poco rentables para las empresas que se dedican al embalaje, por lo que optan por la producción de envases y envolturas nuevas, generando así grandes cantidades de desperdicios los cuales no son aprovechados. Por otro lado, se tiene que el concreto hidráulico es un material utilizado para la pavimentación, aunque por su deficiente resistencia a la flexión puede presentar fallas prematuras reflejadas en agrietamientos que reducen la vida útil del pavimento de manera significativa.

Es por ello por lo que el concreto modificado mediante la adición de polímeros provenientes de desechos plásticos es una alternativa a la solución de los problemas descritos, ya que se obtendrá una opción más para el correcto manejo de los desperdicios generados por plásticos y a su vez un material que, mediante la adición del polímero, obtendrá una mejora en las propiedades mecánicas. Dicha mejora se da por la interacción entre las partículas del polímero y los hidratos del cemento, la cual contribuye a la formación de una película la cual afecta positivamente la microestructura del material y con ello aumentando su rendimiento y durabilidad. (Giustozzi F. 2016)

1.4 Hipótesis y objetivos

Hipótesis:

La adición de homopolímeros provenientes de desechos plásticos a una mezcla de concreto hidráulico en proporciones máximas del 20% aumenta las propiedades de compresión y flexión del material en un 50%, debido a que la interacción entre las partículas del homopolímero y los hidratos de cemento

contribuyen a la formación de una película que mejora la microestructura del material en conjunto.

Objetivo específico:

Desarrollar una mezcla de concreto con homopolímeros reciclados mediante métodos químicos provenientes de desechos plásticos que sea aplicable para funcionar como pavimento rígido y a su vez otorgue propiedades mecánicas superiores a las de un concreto hidráulico común.

2. Marco teórico

La siguiente sección da un panorama de los conceptos relacionados con pavimentos y las diferencias existentes entre un pavimento de concreto hidráulico y uno de concreto asfáltico. Así mismo, se abunda en el tema del concreto polimérico, las investigaciones que se encuentran relacionadas con la experimentación de este material para la medición de sus propiedades mecánicas. Por último, se explica el concepto de los polímeros y específicamente del PET, sus propiedades en general y el problema causado por el abuso en su producción. Se discuten las diferentes alternativas que existen para llevar a cabo su reciclaje y, finalmente, se explica cómo la adición de una resina polimérica a una matriz de cementación contribuye a mejorar las propiedades mecánicas del concreto hidráulico.

2.1 Pavimentos

Históricamente los pavimentos se dividen en 2 amplios grupos, rígidos y flexibles. Yorder y Witczak (1975) los definen de la siguiente manera: “los pavimentos flexibles pueden consistir en una superficie relativamente delgada construida de

concreto asfáltico sobre una base y subbase, y descansan sobre la subrasante compactada. Por el contrario, los pavimentos rígidos están formados por concreto de cemento Portland y pueden o no tener una base entre el pavimento y la subrasante”.

Se puede caer en el cuestionamiento de que tanta flexibilidad o rigidez puede presentar un material para poder obtener una clasificación adecuada, pero para fines prácticos, Rico y del Castillo (1977) sugieren que los pavimentos serán definidos de acuerdo con los materiales que constituyen su capa resistente y no por la forma en como son distribuidos los esfuerzos producidos por la aplicación de las cargas del tránsito. Un pavimento rígido será aquel que su elemento resistente se conforme de concreto hidráulico; para cualquier otro caso se considerará como pavimento flexible.

Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles se constituyen de materiales bituminosos y granulares. De acuerdo con Yang (2004), los métodos de diseño del pavimento flexible se pueden clasificar en 5 categorías: método empírico con o sin prueba de resistencia al suelo, método limitante de falla de corte, método de desviación limitante, método de regresión basado en el rendimiento del pavimento o tramo de prueba y método empírico mecanicista. Los métodos de diseño buscan determinar el número de capas de las cuales se compondrá la estructura del pavimento, así como el espesor óptimo para cada una de ellas, que permita resistir los 2 factores principales causantes del deterioro del pavimento flexible, los cuales son las variaciones en el clima y las cargas impuestas por el tráfico (Alkaissi 2018).

En la tabla 1 se enlistan las características fundamentales que debe tener un pavimento flexible.

Tabla 1. Características fundamentales del pavimento flexible.

Característica	Descripción
Resistencia estructural	Soportar las cargas impuestas por el tránsito dentro del nivel de deterioro y paulatina destrucción previstos en el proyecto.
Deformabilidad	Las deformaciones excesivas están asociadas a estados de falla. Un pavimento deformado puede dejar de cumplir sus funciones, independientemente de que las deformaciones no hayan conducido a un colapso estructural.
Durabilidad	Ligada a una serie de factores económicos y sociales del propio camino. Surgen muchas incertidumbres de carácter práctico para lograrla, por lo que juega un papel importante el sentimiento particular del especialista.
El costo	Un pavimento representa un balance entre la satisfacción de requisitos de resistencia y estabilidad en general por un lado y el costo, por otro. Un diseño correcto será el que llegue a satisfacer los necesarios requerimientos del servicio a costo mínimo.
Los requerimientos de la conservación	Los factores climáticos, la intensidad del tránsito, el futuro comportamiento de las terracerías, las condiciones de drenaje y subdrenaje son los criterios que están directamente relacionados con la conservación de los pavimentos. La falta de conservación tendrá como consecuencia una vida prematura del pavimento.
La comodidad	Especialmente en grandes autopistas y caminos de primer orden, los problemas y métodos del diseño de los pavimentos deben verse afectados por la comodidad que el usuario requiere para transitar a la velocidad de proyecto.

Fuente: Rico y del Castillo (1977).

Pavimentos rígidos

Olivera (1986) da la siguiente definición de un pavimento rígido: La superficie de rodamiento de un pavimento rígido es proporcionada por losas de concreto hidráulico, las cuales distribuyen las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y de las adyacentes, que trabajan en conjunto con la que recibe directamente las cargas. Este tipo de pavimento no puede plegarse a las deformaciones de las capas inferiores sin que se presente la falla estructural. Cemex (2001) considera la siguiente serie de ventajas acerca del pavimento rígido:

- Durabilidad:

Para lograr esta durabilidad es importante considerar además de la resistencia adecuada del concreto ante las sollicitaciones mecánicas, todos los agentes externos de exposición a los que estará sujeto el pavimento para elaborar la mezcla apropiada y definir las recomendaciones para la colocación del concreto hidráulico. Se deben de realizar los proporcionamientos de mezcla adecuados, con ciertas relaciones agua/cemento, utilizando aditivos que permitan una reducción de agua en la mezcla y que den la trabajabilidad adecuada al concreto aun con revenimientos bajos como los utilizados en autopistas.

- Bajo costo de mantenimiento:

Los pavimentos de concreto hidráulico se han caracterizado por requerir de un mínimo mantenimiento a lo largo de su vida útil. Esto es sin duda una de las ventajas mayores que ofrecen estas alternativas de pavimentación. La significativa reducción en los costos de mantenimiento de una vía permite que el concreto sea una opción muy económica.

Esto normalmente se puede visualizar al realizar un análisis del costo ciclo de vida que puede ser comparado con algunas otras alternativas de

pavimentación. El mantenimiento que requieren los pavimentos rígidos es mínimo, sin embargo, es muy importante que el mismo se provea en tiempo y forma adecuados para garantizar las propiedades del pavimento.

- Seguridad:

El concreto hidráulico colocado bajo las especificaciones y con los equipos mencionados anteriormente permite lograr una superficie de rodamiento con alto grado de planicidad y dada su rigidez esta superficie permanece plana durante toda su vida útil, evitando la formación de roderas las cuales disminuyen el área de contacto entre llanta y pavimento produciendo el efecto de acuaplaneo en los días de lluvia. 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. 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:

Los pavimentos de concreto hidráulico permiten ser construidos con altos índices de servicio, como se menciona en el punto anterior se puede lograr un alto grado de planicidad o un índice de perfil muy bueno, adicionalmente siguiendo las recomendaciones de construcción adecuadas se puede proveer al pavimento de una

superficie altamente antiderrapante. La utilización de pasajuntas 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 bajo las losas:

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. La distribución uniforme de las cargas permite que los esfuerzos máximos que se transmiten al cuerpo de soporte sean significativamente menores en magnitud, lo que permite una mejor condición y menor deterioro de los suelos de soporte.

La función que desempeña cada uno de los elementos estructurales de un pavimento de concreto deben estar en completa armonía para cumplir con el objetivo que cada capa tiene, que es la de resistir los efectos del tránsito, intemperismo, durabilidad, factores climáticos, deformaciones, agrietamientos, etc., es por eso que la losa es el elemento principal. La subbase tiene la función primordial de proveer un soporte uniforme, estable y permanente a la losa de concreto durante su construcción y vida útil; asimismo, incrementa la capacidad de carga del terreno de cimentación al aumentar la rigidez de la estructura, esto hace que se impida la migración de finos del terreno de cimentación hacia la superficie de la losa a través de grietas o por medio de las juntas. En sí el terreno de cimentación sirve como superficie de desplante para toda la estructura del pavimento (Garnica *et al.*, 2002).

Yang (2004) otorga la clasificación de pavimentos rígidos mostrada en la figura 1. Se clasifican como:

- a) Pavimentos de concreto con juntas planas
- b) Pavimentos de concreto con juntas reforzadas
- c) Pavimentos de concreto continuamente reforzado

d) Pavimentos de concreto pretensado

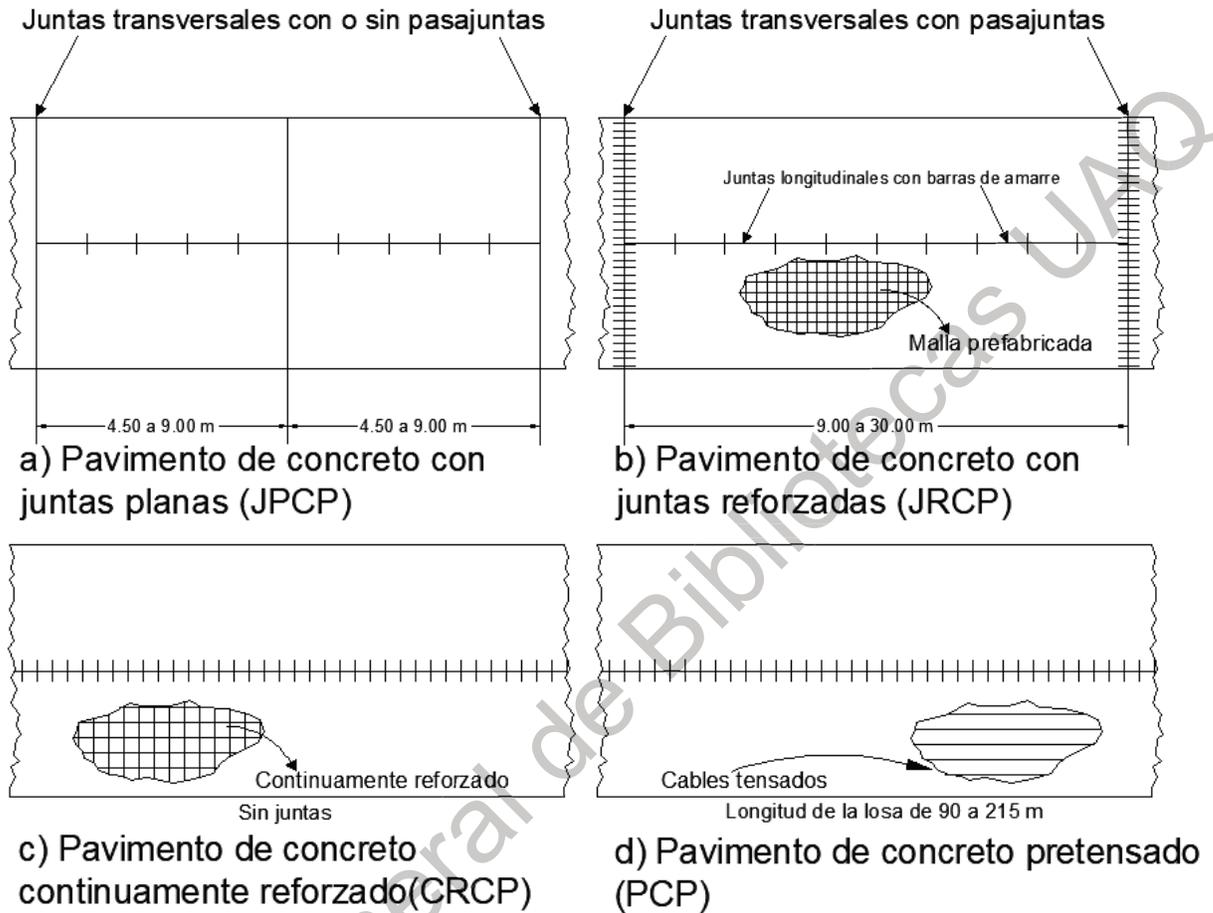


Figura 1. Clasificación de los diferentes tipos de pavimentos rígidos

Fuente: Yang 2004.

Pavimentos de concreto con juntas planas

La mayoría de los pavimentos de concreto suelen ser construidos con juntas de contracción espaciadas estrechamente. El material de sello se encuentra trabado con el agregado y de esta manera puede ser usado para transferir carga a través de la junta. La utilización del material de sellado de juntas depende del amarre que tenga con el agregado, también influye de manera importante el clima en la trabazón con el

tipo de agregado y por propia experiencia el espaciamiento entre las juntas que normalmente suele usarse entre 4.5 y 9.0 m. Sin embargo, cuando el espaciamiento entre las juntas se incrementa, el amarre del agregado decrece y se incrementa también el riesgo a la fractura.

Pavimentos de concreto con juntas reforzadas

El acero para refuerzo en la forma de alambre de malla o barras no incrementa la capacidad estructural del pavimento, pero sí permite que el espaciamiento entre las juntas sea más largo, este espaciamiento varía a lo largo del panel alrededor de los 9 a los 30 metros en estos casos los pasadores son requeridos para transferir la carga a través de las juntas. La cantidad de acero distribuido se incrementa en los pavimentos de concreto con refuerzo debido al incremento del espaciamiento de las juntas. Sin embargo, el número de juntas y pasadores decrece en el costo con el incremento en el espaciamiento de las juntas.

Pavimentos de concreto reforzado

Fue la eliminación de las juntas lo que provocó el primer uso experimental de CRCP en 1921 en Columbia Pike cerca de Washington, D.C. Las ventajas del diseño sin juntas fueron ampliamente aceptadas por muchos estados, y más de dos docenas de estados han usado CRCP en caminos con dos de carriles que suman más de 20,000 millas (32,000 km). Originalmente se comprendió que las juntas eran los puntos débiles en los pavimentos rígidos y que la eliminación de las juntas disminuiría el espesor del pavimento requerido. Como resultado, el grosor de los CRCP se ha reducido empíricamente en 1 a 2 pulgadas (25 a 50 mm) o arbitrariamente tomada como 70 a 80% del pavimento convencional. La formación de grietas transversales a intervalos relativamente cortos de distancia es una característica de los CRCP. Estas grietas están sostenidas herméticamente por el refuerzo y no deben ser de

preocupación siempre y cuándo se encuentren distribuidas espacialmente de manera uniforme. La falla que ocurre con mayor frecuencia en los CRCP son las perforaciones en los bordes del pavimento. Este tipo de falla toma lugar aleatoriamente entre dos grietas transversales paralelas o en la intersección de las grietas de tipo Y. Si la falla del pavimento ocurre en el borde en lugar de la junta, no hay motivo para emplear un CRCP más delgado. En 1986, la guía de diseño AASHTO sugirió el uso de la misma ecuación o los mismos nomogramas para la determinación de los espesores de pavimentos de concreto con juntas reforzadas y pavimentos de concreto reforzado. Sin embargo, se recomendó que los coeficientes de transferencia de carga sean más pequeños que los de los pavimentos de concreto con juntas planas o pavimentos de concreto con juntas reforzadas, los cuales pueden tener resultados en espesores delgados de pavimentos de concreto reforzado. La cantidad de acero longitudinal de refuerzo puede ser diseñada para controlar el espaciamiento y ancho de las fracturas y el esfuerzo máximo en el acero.

Pavimentos de concreto pretensado

El concreto es débil en tensión, pero resistente a compresión. El espesor del pavimento rígido está determinado por su módulo de ruptura, el cual varía con la resistencia a la tensión del concreto. La aplicación previa de un esfuerzo a compresión al concreto reduce ampliamente el esfuerzo a tensión causado por las cargas del tráfico y con esto, se disminuye el espesor requerido. Los pavimentos de concreto pretensado tienen menos probabilidad a sufrir agrietamientos y a su vez, un menor uso de juntas y por esto resulta en un menor mantenimiento y una mayor vida del pavimento. La primera autopista de concreto pretensado en los Estados Unidos fue de 91 metros construida en Delaware en 1971. Seguida a ésta, en el mismo año surgió como demostración, un proyecto de 976 m que consistió en un camino de acceso al Aeropuerto Internacional de Dulles. En 1973 se construyó un proyecto de

demostración de 4 km en Pennsylvania. Estos proyectos fueron precedidos por un programa de construcción y pruebas en un pavimento pretensado experimental construido en Pittsburgh, Pennsylvania en 1956. Estos proyectos tenían las siguientes características:

1. La longitud de las losas varían de 91 a 232 m (300 a 760 ft).
2. El espesor de la losa fue de 15.2 cm (6 plg).
3. El método del poste de tensión con siete filamentos de alambre de acero. Este método del poste tensado fue utilizado, los esfuerzos de compresión fueron impuestos después del concreto, obteniendo la suficiente ganancia para soportar las fuerzas aplicadas.
4. El pretensado longitudinal varía de 1.4 a 2.3 MPa (200 a 331 psi) y no se utilizó pretensado transversal o diagonal.

Métodos de diseño de pavimentos rígidos

El método de diseño AASHTO 93 introduce el concepto de serviciabilidad en el diseño de pavimentos como una medida de su capacidad para brindar una superficie lisa y suave al usuario. El diseño del pavimento rígido involucra el análisis de diversos factores: tráfico, drenaje, clima, características de los suelos, capacidad de transferencia de carga, nivel de serviciabilidad deseado, y el grado de confiabilidad al que se desea efectuar el diseño acorde con el grado de importancia de la carretera. Todos estos factores son necesarios para predecir un comportamiento confiable de la estructura del pavimento y evitar que el daño del pavimento alcance el nivel de colapso durante su vida en servicio.

La ecuación fundamental AASHTO (1) para el diseño de pavimentos rígidos

es:

$$\text{Log } W_{18} = Z_R S_o + 7.35 \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{\frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 P_t) \log \left[\frac{S_c C_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}} \right]} \right] \quad (1)$$

Donde:

W_{18} = Número de cargas de 18 kips (80 kN) previstas (ESAL's).

Z_R = Es el valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada, para una confiabilidad R.

S_o = Error estándar combinado de las variables

D = Espesor de la losa del pavimento en pulgadas

ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad prevista en el diseño

P_t = Serviciabilidad final

S'_c = Módulo de ruptura del concreto en psi

J = Coeficiente de transferencia de carga

C_d = Coeficiente de drenaje

E_c = Módulo de elasticidad del concreto, en psi

K = Módulo de reacción de la subrasante (coeficiente de balastro), en pci

Esta ecuación y el procedimiento descrito en la guía AASHTO dan como resultado la determinación de un espesor D de un pavimento de concreto hidráulico para que este pueda soportar el paso de un cierto número de ejes equivalentes de 18 kilolibras sin que se produzca una disminución en el índice de servicio superior a un valor determinado de ΔPSI (pérdida de serviciabilidad prevista en el diseño).

2.2 Concretos poliméricos

En la búsqueda de mejorar las propiedades mecánicas del concreto hidráulico y a su vez desarrollar un material competente en el sentido ecológico, se tiene que, por medio de diversas metodologías que contemplan la adición de polímeros a la mezcla es posible hacer más económica la producción de un concreto, empleando materiales reciclables (Krishnamoorthy et al. 2016) tales como plásticos no biodegradables provenientes de desechos urbanos, lo cual a su vez contribuirá a generar impactos positivos en el medio ambiente. Esto lleva al desarrollo del concreto polimérico, el cual es un material compuesto, formado por la combinación de agregados pétreos de tipo gruesos y finos con un monómero polimerizante (Vipulanandan y Paul 1992). De este material ya se han realizado diversas investigaciones encontrando mejoras en las propiedades mecánicas de compresión, tensión y flexión.

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del concreto es la medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras. La resistencia a la compresión se mide fracturando probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión. La resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida por el área de la sección que resiste a la carga (véase la ecuación 2), y se reporta en unidades de libra-fuerza por pulgada cuadrada (psi) en unidades corrientes utilizadas en EU o en megapascales (MPa) en unidades SI.

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Dónde:

f_c = resistencia a la compresión

F= carga máxima

A= área del espécimen

Un resultado de prueba es el promedio de por lo menos 2 pruebas de resistencia curadas de manera estándar o convencional elaboradas con la misma muestra de concreto y sometidas a ensayo a la misma edad. En la mayoría de los casos, los requerimientos de resistencia para el concreto se realizan a la edad de 28 días.

En lo que respecta a la resistencia a la compresión presentada en concretos con diferentes mezclas de polímeros, de acuerdo con la investigación llevada a cabo por Muthukumar y Mohan (2004), la adición de polímeros al concreto hidráulico incrementó la resistencia a la compresión de este. Su estudio se enfocó en el desarrollo de un concreto polimérico con resinas de furano basadas en alcohol furfúrico, furfuraldehído y formaldehído, siendo sintetizadas y codificadas como Resina A, B, C, D y E además de la adición de polvo de sílice (micro-relleno) en diferentes proporciones, creando concretos poliméricos con diferentes dosificaciones en 15 versiones diferentes, como es mostrado en la tabla 2.

Tabla 2. Combinaciones de las mezclas de diseño para concretos poliméricos con resinas de furano

Combinación	Resina %	Agregado %	Micro-relleno %
1	7.5	87.5	5
1a	7.5	87.5	5
2	7.5	77.5	15
2a	7.5	77.5	15
3	9.375	83.125	7.5
4	11.25	83.75	5
5	11.25	78.75	10
6	11.25	76.25	12.5
7	11.25	73.75	15
8	13.125	79.375	7.5
9	15	80	5
9a	15	80	5
10	15	75	10
11	15	70	15
11a	15	70	15

El sufijo "a" se refiere a combinaciones repetidas para dar cuenta de las estadísticas de falta de ajuste

Fuente: Muthukumar y Mohan (2004).

De estas combinaciones, se obtuvieron los siguientes resultados a la compresión simple, mostrados en la tabla 3:

Tabla 3. Resultados a la compresión simple

Resina	Días	Resistencia a la compresión en diferentes sistemas de resinas (kg/cm ²)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1a	2a	9a	11a
A	1	42	42	23	42	43	45	46	26	20	21	25	431	524	361	410
	3	243	284	284	272	280	286	290	263	210	214	224				
	7	446	551	566	544	586	590	602	556	372	385	424				
B	1	447	499	339	381	392	396	398	308	320	317	325				
	3	643	678	586	662	671	675	678	612	583	526	532	798	806	667	703
	7	805	819	769	775	799	810	820	760	675	705	720				
C	1	662	713	570	476	492	493	502	544	423	387	419				
	3	746	818	768	611	625	632	649	700	693	709	750				
	7	779	843	823	646	666	675	712	710	726	760	812	797	831	744	803
D	1	614	724	678	641	657	658	675	631	605	571	578				
	3	695	779	711	691	712	715	743	682	638	677	680	769	774	719	725
	7	773	789	786	725	744	750	775	710	710	719	717				
E	1	474	467	307	287	310	303	305	198	207	242	249				
	3	587	638	560	501	518	520	520	493	477	495	514				
	7	671	751	698	689	712	708	714	702	677	712	697	660	743	664	699

Fuente: Muthukumar y Mohan (2004).

Posteriormente, se desarrolló el siguiente resumen, mostrado en la tabla 4, del cual se expresan las resistencias a compresión óptimas predichas, así como las resistencias máximas obtenidas en función del tipo de resina utilizada.

Tabla 4. Máximos experimentales óptimos y predichos a la compresión simple

Propiedad	Descripción	Datos de entrada, %			Resistencia a la compresión, kg/cm ²
		Resina	Agregado	Micro-relleno	
Resina A	Máximo experimental	11.25	73.75	15	602
	Óptimo Predicho	10.43	74.57	15	619
Resina B	Máximo experimental	11.25	73.75	15	820
	Óptimo Predicho	9.08	75.95	14.98	823
Resina C	Máximo experimental	7.5	77.5	15	843
	Óptimo Predicho	8.5	76.5	15	780
Resina D	Máximo experimental	7.5	77.5	15	789
	Óptimo Predicho	8.55	76.48	14.98	778
Resina E	Máximo experimental	7.5	77.5	15	751
	Óptimo Predicho	8.5	76.74	14.76	737

Fuente: Muthukumar y Mohan (2004)

De la tabla 4 así como del estudio realizado que, en lo respectivo a la compresión, se concluyó que en ninguna otra investigación elaborada anteriormente de concretos poliméricos con resinas de furano se habían obtenido valores de compresión de tal magnitud.

Por su parte, en Huang *et al.* (2010), se puede encontrar un resultado similar, en la cual se elaboraron mezclas de concreto permeable con látex, así como también, en mezclas diferentes, se añadieron fibras de polipropileno, para ambos casos realizando ensayos con y sin arena, obteniendo resultados positivos a la compresión y tensión. La resistencia a la compresión se ensayó a los 7 días siguiendo la prueba ASTM C39. El ensayo de resistencia a la compresión se llevó a cabo en un marco de carga INSTRON en muestras triplicadas cilíndricas con un diámetro de 152 mm y una altura de 305 mm.

En los resultados de la resistencia a la compresión presentados en la Figura 2, se puede apreciar que al añadir látex (a) y/o arena (b), en ambos casos se tiene la capacidad de aumentar la resistencia a la compresión en las mezclas.

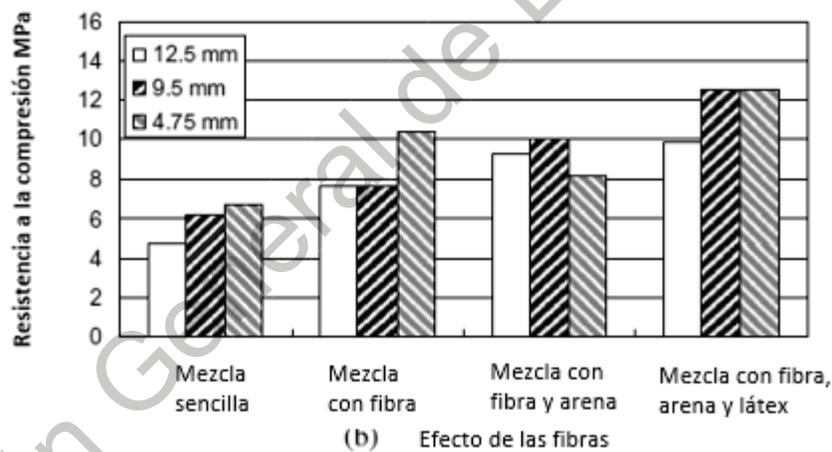
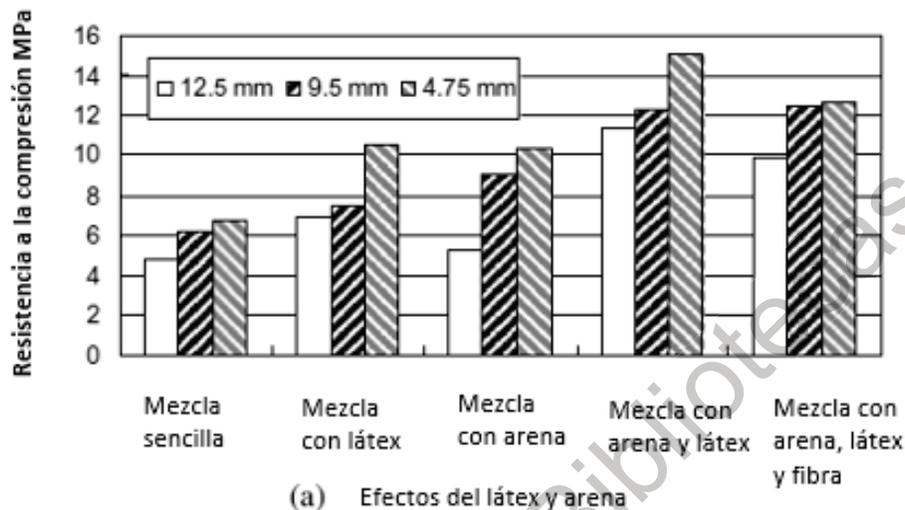


Figura 2. Resultados y comparación de resistencias a compresión para diferentes mezclas de arena, látex y fibras

Fuente: Huang *et al.* (2009).

Dados los resultados a la compresión observados, se han desarrollado investigaciones con variantes de concretos poliméricos aplicados a elementos

estructurales. Sujatha *et al.* (2012) fabricaron y probaron 12 columnas esbeltas de concreto geopolimérico armado con un grado de resistencia a la compresión de entre 30 y 50 MPa. Las columnas de concreto armado se ensayaron bajo carga axial sin excentricidad. Se encontró que las columnas de concreto con geopolímeros tenían una capacidad de carga hasta un 34% más alta, así como una mayor rigidez en comparación con las correspondientes columnas de concreto hecho a base de cemento.

Pereira *et al.* (2017) llevaron a cabo una investigación experimental la cual consistió en la adición de fibras de PET con diferentes longitudes y porcentajes a mezclas de concreto hidráulico, haciendo 11 ensayos a compresión y tensión a 66 especímenes curados durante 28 días, variando principalmente las longitudes y los porcentajes en volúmenes de las fibras contenidas en la mezcla, tal y como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Número de ensayos y variaciones entre las longitudes de las fibras de PET y su contenido en porcentajes de volumen para cada mezcla de concreto hidráulico

Ensayo	Longitud de fibra (mm)	Porcentaje de volumen de fibras (%)
1	10	0.1
2	10	0.3
3	20	0.1
4	20	0.3
5	7.9	0.2
6	22	0.2
7	15	0.005
8	15	0.34
9	15	0.2
10	15	0.2
11	0	0

Fuente: Pereira *et al.* (2017).

En esta investigación fueron encontrados incrementos en la resistencia a la compresión y la tensión debidas a la adición de fibras de PET. Los resultados son mostrados en la tabla 6.

Tabla 6. Valores obtenidos en MPa por los ensayos de compresión (Cn) y de tensión (Tn) con sus respectivos coeficientes de variación (CV) entre las 6 repeticiones elaboradas para cada ensayo

Ensayo (n)	Cn	CV	Tn	CV
1	46+-1	2.95	3.8+-0.2	4.01
2	44+-2	3.55	3.7+-0.4	9.77
3	44+-1	1.4	4.1+-0.2	3.59
4	43.3+-0.2	0.46	3.9+-0.2	4.46
5	43+-1	2.24	3.8+-0.2	5.57
6	42+-1	1.79	3.9+-0.1	3.55

7	45.5+0.4	0.94	4.1+0.3	6.25
8	44+-1	1.83	3.9+0.1	1.5
9	42+-5	10.9	3.9+0.2	6.2
10	43+-2	5.26	4.0+0.3	7.43
11	40+-1	3.17	3.5+0.3	8.83

Fuente: Pereira *et al.* (2017).

Partiendo de que se tiene un resultado favorable en las mejoras de las propiedades mecánicas mediante la adición de fibras de PET, mediante un análisis de varianza fue posible determinar que la longitud óptima de las fibras de PET es de 22 mm y el porcentaje de volumen ideal en la mezcla de concreto hidráulico es del 0.06%. En la tabla 7 se muestran los resultados de compresión y tensión obtenidos para esta mezcla en comparativa con los resultados obtenidos para un concreto hidráulico convencional.

Tabla 7. Valores obtenidos de compresión y tensión para una mezcla de concreto hidráulico común y una modificada con fibras de PET con longitud y porcentaje de volumen óptimos.

Especificación	Resistencia obtenida (Mpa)	
	Compresión	Tensión
Concreto ecológico	47+-1	4.3+-0.2
Concreto convencional	40+-1	3.5+-0.3

Fuente: Pereira *et al.* (2017).

El resultado obtenido por Pereira et al. (2017) fue positivo en cuestiones de obtener incrementos en la compresión y tensión del concreto hidráulico. Sin embargo, hay criterios que deben tomarse en cuenta para poder predecir si dicha adición traerá consigo resultados favorables. De acuerdo con la investigación llevada a cabo por Pelisser et al. (2012), si se hace una adición de fibras de PET mayor al 0.30% del volumen de la mezcla, la resistencia a la compresión será reducida en un 10%. Además, se debe tener en cuenta que las dimensiones y el tipo de fibra tendrán una influencia directa en el desempeño del concreto hidráulico (Mehta y Monteiro, 2008). El incremento o decremento de la resistencia del concreto hidráulico se encuentra relacionado directamente con el módulo de elasticidad del material empleado para la obtención de la fibra (Gu y Ozbakkaloglu, 2016). De igual manera, en la investigación experimental desarrollada por Fraternali *et al.* (2014) se pudo determinar que un concreto que contenga 13.4 kg/m³ de fibras de PET reducirá su resistencia a la compresión en un 8.2% relacionado con un concreto convencional. Así mismo, de una gran cantidad de investigaciones fue posible notar que la resistencia a la compresión mejora sólo cuando se tiene una pequeña cantidad de fibras. Cuando el contenido de las fibras incrementa, la tendencia que se tiene será que la resistencia a la compresión tenga disminuciones significativas (Bagherzadeh et al. 2011) (Karahana y Atis, 2011) (Kayali et al. 2013) (Nibudey et al. 2013) (Ramadevi y Manju, 2012) (Wang et al. 2000). Así entonces, se puede definir de manera general para cualquier concreto modificado con fibras de PET que la resistencia a la compresión aumentará al tenerse incrementos en el volumen de las fibras de PET al alcanzar hasta el 1% del contenido del volumen total, incrementando la resistencia hasta en un 10% aproximadamente. Posterior a ello, al tener valores de contenido de 1.5% o mayores, la resistencia a la compresión disminuirá notablemente (Ochi et al. 2007).

Por otro lado, se tiene la adición de diferente tipo de plásticos reciclados a la matriz del concreto hidráulico en forma fina, haciendo la sustitución parcial de éstos por los agregados finos. De acuerdo con lo reportado por Kou *et al.* (2009), al

hacerse dicha sustitución por PVC molido se tienen disminuciones en la resistencia a la compresión. Para sustituciones en volumen de agregados finos por PVC en 5%, 15%, 30% y 45% las resistencias a la compresión fueron 9.1%, 18.6%, 21.8% y 47.3% más bajas, respectivamente, que las de la mezcla de concreto hidráulico común. A diferencia de esto, se tiene que el concreto preparado con un reemplazo parcial por PVC es más ligero (menor densidad), más dúctil (mayores relaciones de Poisson y menor módulo de elasticidad), y tiene una menor contracción de secado y mayor resistencia a la penetración de iones cloruro. En el día 28, las cargas totales pasadas en coulombs de porcentajes de reemplazo del 5%, 15%, 30% y 45% se redujeron en 11.9%, 19.0%, 26.9% y 36.2%, respectivamente, cuando se compararon con las de la mezcla de control. El aumento de la resistencia a la penetración del ion cloruro del concreto se atribuye a los granulares de PVC son impermeables y por ello bloquean el paso del ion cloruro. Consecuente a la adición de PET como sustitución del agregado, en su investigación, Saikia y Brito (2014) pudieron determinar que la diferente distribución de formas y tamaños del PET como agregados da como resultado variaciones en la resistencia a la compresión del concreto, aun para los mismos porcentajes de sustitución.

Resistencia a la tensión

Se puede mencionar que generalmente las resistencias a la tensión y a la flexión del concreto son del orden del 10 y 15 por ciento, respectivamente, de la resistencia a la compresión. La razón para tan gran diferencia entre la resistencia a la tensión y a la compresión se atribuye a la compleja y heterogénea estructura del concreto. Las pruebas directas de tensión del concreto raramente se realizan, principalmente porque los dispositivos para sujetar los especímenes introducen esfuerzos secundarios que no pueden ser ignorados. Las pruebas más comúnmente usadas para estimar la resistencia a la tensión del concreto son la prueba de tensión

por compresión diametral ASTM C496 y la prueba de flexión con carga en los tercios del claro ASTM C78. En la prueba de tensión por compresión diametral, un cilindro de concreto de 15x30 cm es sujeto a cargas de compresión a lo largo de dos líneas axiales que son diametralmente opuestas. La carga es aplicada continuamente a una velocidad constante dentro del rango del esfuerzo de tensión por compresión diametral de 0.69 a 1.28 MPa hasta que el espécimen falle. El esfuerzo a la compresión produce un esfuerzo transversal de tensión por compresión diametral que es uniforme a lo largo del diámetro vertical. Para calcular la resistencia a la compresión diametral se utiliza la ecuación 3. (Mehta y Monteiro, 2008)

$$T = \frac{2P}{\pi ld} \quad (3)$$

Dónde:

T= resistencia a la tensión por compresión diametral

P= carga de falla

l= longitud

d= diámetro del espécimen

Para la resistencia a la tensión del concreto polimérico modificado mediante la sustitución de agregados finos a la mezcla por plástico molido se tiene un resultado parecido a lo mostrado al hacer la evaluación a la resistencia a la compresión simple. Esto quiere decir que la resistencia a la tensión por lo general es menor que la registrada en un concreto hidráulico convencional, considerando la misma relación A/C para ambos. De forma general se tiene que la resistencia a la

tensión disminuye a medida que aumenta el porcentaje de volumen del polímero añadido como agregado fino. Además, se encontró que aquellos concretos poliméricos en los que se añadieron formas irregulares de plástico, tuvieron resistencias menores en comparativa con los que la forma del agregado fue uniforme. Un punto importante a resaltar también es que, al añadir fracciones de polímero como agregado con valores de módulo elástico bajo, se tendrán valores de resistencia a la tensión menores en comparativa con aquellos que tengan módulos elásticos altos (Kou *et al.* 2009) (Saikia y Brito 2014) (Albano *et al.* 2009) (Asokan *et al.* 2010) (Babu *et al.* 2006) (Babu *et al.* 2005) (Babu y Babu 2003) (Chaudhary *et al.* 2014) (Chen y Liu 2004) (Choi *et al.* 2005) (Choi *et al.* 2009) (Ferreira *et al.* 2012) (Frigione 2010) (Galvão *et al.* 2011) (Juki *et al.* 2013) (Kan y Demirboga 2009) (Lima *et al.* 2010) (Ravindrarajah *et al.* 1994) (Saikia y Brito 2013) (Tang *et al.* 2008) (Wang y Meyer 2012).

De acuerdo con lo desarrollado por Kou *et al.* (2009), a mayor adición de agregados finos de PVC, la resistencia a la tensión será menor, como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Resistencia a la tensión encontrada al hacer sustitución de arena por agregados finos producto de la molienda de tuberías de PVC

Código de la mezcla	Contenido de PVC (kg/m ³)	Resistencia a la tensión (Mpa)		
		7 días	28 días	91 días
P0	0	2.48	3.06	3.25
P5	5	2.23	2.89	3
P15	15	1.97	2.62	2.88
P30	30	1.78	2.58	2.68
P45	45	1.47	1.83	1.99

Fuente: Kou *et al.* (2009).

También, de esta investigación se hace notar que la correlación entre la resistencia a la tensión y la resistencia a la compresión simple es lineal con un $R^2=0.9933$, resultado también obtenido en lo desarrollado por Tang *et al.* (2008), obteniendo un $R^2=0.97$.

Por otro lado, se tiene la resistencia a la tensión del concreto modificado con fibras de plásticos reciclados, de la cual la mayoría de las investigaciones coinciden con que la resistencia incrementó al hacer una adición de plástico en fibras. Se puede afirmar que, a mayor porcentaje de fibras en la mezcla, mayor será la resistencia a la tensión. (Bagherzadeh *et al.* 2011) (Hsie *et al.* 2008) (Nili y Afroughsabet, 2010) (Song *et al.* 2005) (Suji *et al.* 2007). Ejemplo de ello se puede apreciar en la tabla 9, desarrollada en la investigación de Hsie *et al.* (2008).

Tabla 9. Resistencia a la tensión encontrada al añadir fibras de monofilamento de polipropileno (P1) y fibras cortadas de polipropileno (P2) al concreto hidráulico

Número de mezcla	Dosificación de fibra		Resistencia a la tensión	
	P1 (kg/m ³)	P2 (kg/m ³)	Medida (Mpa)	Efectividad de resistencia
M-0	0	0	2.399	-----
M-1	3	0	2.425	1.08
M-2	6	0	2.463	2.67
M-3	9	0	2.601	8.42
M-4	0	0.6	2.502	4.3
M-5	3	0.6	2.612	8.88
M-6	6	0.6	2.677	11.59
M-7	9	0.6	2.719	13.35

Fuente: Hsie *et al.* (2009).

Este comportamiento puede explicarse ya que una vez que existe la separación del elemento ensayado a tensión, las fibras actúan como una unión entre

el elemento y las mismas y continúan soportando el esfuerzo producido por la carga (Song *et al.* 2005). Por otro lado, en otras investigaciones se tiene que la resistencia a la tensión solo mejora cuando el concreto tiene una pequeña cantidad de fibras. Cuando la cantidad de fibras aumenta, la resistencia a la tensión se ve disminuida (Kayali *et al.* 2013) (Nibudey *et al.* 2013) (Ramadevi y Manju, 2012) (Kayali 1999) (Wang *et al.* 1994). De acuerdo con lo desarrollado por Kayali *et al.* (1999), la resistencia a la tensión incrementa al tenerse un valor de fibras de 0.56% y al entrar al rango del 1%, la resistencia a la tensión presenta un ligero decremento. Por otra parte, Nibudey *et al.* (2013) reportaron que la resistencia a la tensión incrementa un 18.6% al tener un contenido de fibras de PET del 1%, y después reducía un 19% con un contenido de fibras 3%.

Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del concreto. Es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto no reforzada. Se mide mediante la aplicación de cargas a vigas de concreto de 6 x 6 pulgadas de sección transversal y longitud como mínimo de 3 veces el espesor. La resistencia a la flexión se indica como el módulo de ruptura (M_r) el cual es un indicador de la resistencia a la tensión y puede ser definido como el esfuerzo máximo a tensión para que ocurra la ruptura durante un ensaye de flexión de una viga de concreto simplemente apoyada (Garnica *et al.* 2002). El módulo de ruptura es cerca del 10% al 20% de la resistencia a la compresión, en dependencia del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado, sin embargo, la mejor correlación para los materiales específicos es obtenida mediante ensayos de laboratorio para los materiales dados y el diseño de la mezcla. En la figura 3 se muestra un ensaye de módulo de ruptura de acuerdo con lo descrito con la norma ASTM C78.

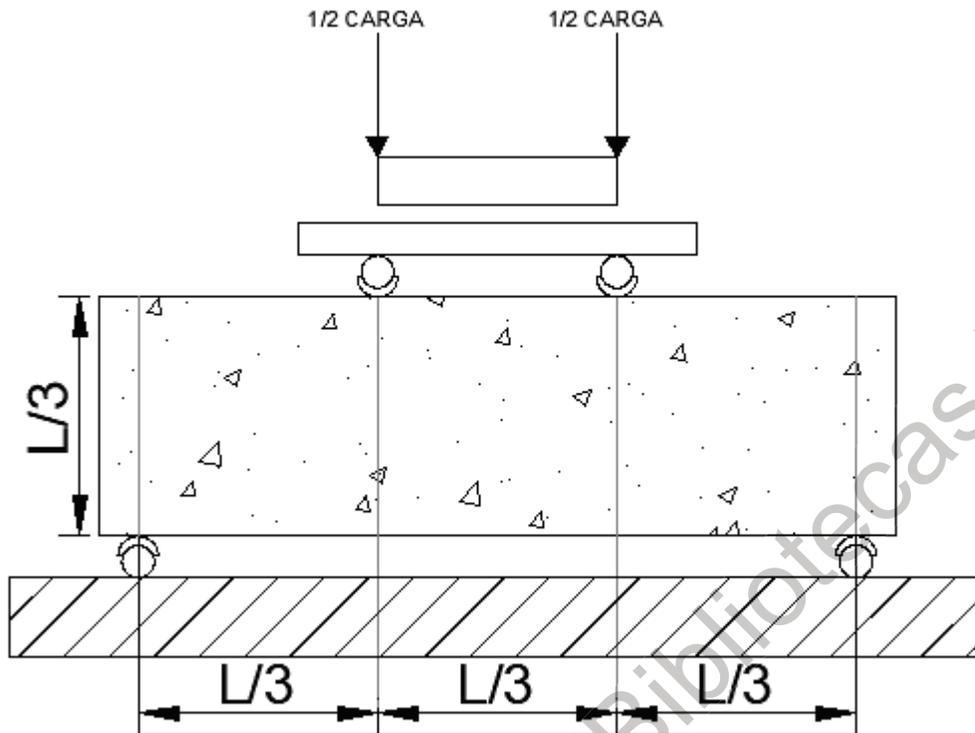


Figura 3. Esquema del módulo de ruptura descrito en la norma ASTM C78

Fuente: Garnica *et al.* 2002.

El módulo de ruptura es obtenido mediante la ecuación 4.

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (4)$$

Dónde:

R= módulo de ruptura

P= carga máxima indicada

L=longitud del claro

b=ancho del espécimen

d=peralte del espécimen

Es importante hacer notar que esta fórmula sólo es válida si la fractura en la superficie de tensión está dentro del tercio medio de la longitud del claro. Si la fractura está fuera pero no más de 5% de la longitud del claro, se usará la ecuación 5.

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (5)$$

Dónde:

R= módulo de ruptura

P= carga máxima indicada

a= distancia promedio entre la línea de fractura y el apoyo más cercano medido en la superficie a tensión de la viga

b=ancho del espécimen

d=peralte del espécimen

Cuando la fractura está fuera por más de 5 por ciento de la longitud del claro, los resultados de la prueba son descartados (Mehta y Monteiro, 2008).

El concreto polimérico modificado mediante la sustitución de agregados finos presenta resistencias a la flexión menores que las presentadas en un concreto hidráulico convencional, considerando la misma relación agua/cemento, tal y como es el caso de la resistencia a la compresión (Saikia y Brito 2014) (Albano *et al.* 2009)

(Juki *et al.* 2013) (Kan y Demirboga 2009) (Akçaözog̃lu *et al.* 2010) (Akçaözog̃lu *et al.* 2014) (Ge *et al.* 2013) (Ismail y Hashmi 2008) (Marzouk *et al.* 2007) (Rai *et al.* 2012) (Saikia y Brito 2013). En las sustituciones es posible encontrarse un decremento lineal en la resistencia a la flexión con el incremento de agregados de PET (Akçaözog̃lu *et al.* 2010). Sin embargo, Rai *et al.* (2012) encontraron una ligera reducción en la resistencia a la flexión cuando el nivel de sustitución se encontró en el rango de 0-15%. En lo relacionado a la resistencia a la flexión del concreto polimérico modificado con fibras, por diversas investigaciones se tiene que esta propiedad incrementa de manera significativa (Pelisser *et al.* 2012) (Ramadevi y Manju, 2012) (Ochi *et al.* 2007) (Suji *et al.* 2007) (Bagherzadeh *et al.* 2011) (de Oliveira *et al.* 2011) (López-Buendía *et al.* 2013) (Mazaheripour *et al.* 2011) (Nili y Afroughsabet 2010) (Toutanji *et al.* 1998). Los resultados obtenidos por las investigaciones mencionadas se desarrollan en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados obtenidos a la flexión por diversas investigaciones relacionadas con concretos poliméricos.

Autor	Investigación	Metodología	Resultados
Toutanji <i>et al.</i> (1998)	Permeabilidad a los cloruros y resistencia al impacto de concreto con humo de sílice reforzado con fibras de polipropileno	Fueron utilizadas 2 longitudes de fibras de polipropileno (12.5 y 19 mm) y 4 volúmenes de fibra (0,0.1%,0.3% y 0.5%). El humo de sílice fue utilizado en reemplazo del cemento, del cual se emplearon 2 contenidos, 5% y 10%. Se midió la resistencia de impacto (ACI 544 Commite) y la permeabilidad a los cloruros (AASHTO T277)	La resistencia al impacto más alta encontrada fue la que tenía la mayor cantidad de fibras (0.5% en volumen) con una longitud de 12.5 mm y con el contenido más alto de humo sílice. Es posible apreciar incrementos a mayor cantidad del contenido de fibras, por lo que se concluyó que las fibras aportan al concreto una resistencia al impacto
Suji <i>et al.</i> (2007)	Estudio experimental acerca del comportamiento de vigas de concreto con fibras de polipropileno	La marca comercial de fibras de polipropileno "Fiber mesh" fue empleada en mezclas de concreto hidráulico, con una longitud de 24 mm y dosificaciones de 0.9, 1.8 y 2.7 kg/m ³ , realizando un total de 3 mezclas, con estos 3 contenidos de fibras. Se evaluaron las propiedades mecánicas y el revenimiento del concreto producido	Se encontraron incrementos en la resistencia a la flexión del 21%, 16.6% y 23% respectivamente para cada dosificación. En todos los casos, las mezclas con un contenido fibras presentaron una mayor resistencia al concreto hidráulico ordinario. Se notó una tendencia de incremento en la resistencia de acuerdo con un mayor contenido fibras
Ochi <i>et al.</i> (2007)	Desarrollo de fibras de PET recicladas y su aplicación como refuerzo en concreto	Se describe un método para desarrollar concreto reforzado con fibras de PET. Se evaluaron propiedades mecánicas de compresión y flexión del concreto reforzado, desarrollando 3 mezclas con diferente relación A/C y cada una con porcentajes de 0.0, 0.5, 1.0 y 1.5%	El contenido de fibras aporta mayor resistencia al concreto hidráulico. En las mezclas con contenidos de 0 a 1% el incremento en la resistencia fue poco notable (alrededor de 0.10 MPa por incremento en el contenido), pero en el incremento de 1% a 1.5% se tuvo un aumento de 0.70% MPa

Nili y Afroughsabet (2010)	Los efectos del humo de sílice y fibras de polipropileno en la resistencia de impacto y las propiedades mecánicas del concreto	Se examinaron la resistencia de impacto y el rendimiento obtenido al someter a diversos esfuerzos a 2 mezclas de concreto con diferente relación a/c modificadas con fibras de polipropileno con longitudes de 12 mm y contenidos en volumen del 0%, 0.2%, 0.3% y 0.5%. El humo de sílice fue utilizado para complementar la resistencia del material, haciendo reemplazos en el peso del cemento del 8%.	La resistencia a la flexión incrementó considerablemente en todas las combinaciones, especialmente con el 0.5% de contenido de fibras. Los incrementos en este porcentaje fueron del 20.5% con una relación a/c de 0.46. Para una relación a/c de 0.36 se tuvo un decremento con la mezcla de 0.5% de contenido de fibras, siendo el 0.3% donde aún se presentaron mejoras.
de Oliveira y Castro (2011)	Comportamiento físico y mecánico de mortero reforzado con fibras de PET reciclado	Se obtuvieron fibras de PET de botellas recicladas y se aplicaron a morteros de cal-cemento como refuerzo empleando volúmenes de fibras del 0%, 0.5%, 1.0% y 1.5%. Finalmente, se midieron propiedades mecánicas a los especímenes.	Los resultados obtenidos exponen que la incorporación de fibras incrementó la resistencia a la flexión en el orden del 60% al 100% en 7 días, 30% en 28 días y 50% a 63 días. No hubo cambios importantes en el rango de los 7 a los 28 días, sin embargo, a los 63 días se obtuvo más del doble de la resistencia obtenida a 7 días.
Bagherzadeh et al. (2011)	Uso de fibras de polipropileno para mejorar propiedades físicas y mecánicas del concreto	Se emplearon 2 longitudes de fibras, 12 mm y 19 mm, así como 2 proporciones diferentes de 0.1% y 0.3%. Se evaluaron resistencias a la tensión, compresión, flexión, agrietamientos por contracción y absorción de agua y aire.	La adición de fibras de polipropileno contribuyó a incrementar la resistencia a la flexión. Es apreciable notar que a mayor contenido de fibras se tiene una mayor resistencia a la flexión. Esto se debe a la contribución de las fibras durante la aplicación de la carga a tensión, las cuales mejoran la microestructura y retrasan la presencia de fracturas en el espécimen.

Mazaheripour et al. (2011)	El efecto de fibras de polipropileno en las propiedades de concreto autocompactable de peso ligero en estado fresco y endurecido	Se desarrolló concreto modificado con fibras de polipropileno con longitud de 12 mm con valores en volumen de 0.1%, 0.2% y 0.3% para cada mezcla. Posterior a la evaluación de las propiedades en estado fresco, se evaluó la resistencia a la compresión, flexión, tensión y se obtuvo el módulo de elasticidad. Todas las propiedades se midieron a una edad de 28 días.	Se concluyó que al tener incrementos en el porcentaje de volumen se tienen incrementos en la resistencia a la flexión de manera directa. Se tuvieron incrementos de 8.7% y 10.7% para dos mezclas con dosificaciones y características diferentes, en comparativa con la mezcla de control que no contó con fibras de polipropileno como refuerzo.
Pelisser et al. (2012)	Propiedades mecánicas de concreto reforzado con fibras de PET reciclado	En este estudio experimental se utilizaron fibras con longitudes de 10, 15 y 20 mm y contenidos en volumen de 0.05%, 0.18% y 0.30% en una mezcla de concreto. Se determinó la resistencia a la compresión, flexión, el módulo de Young.	Al hacer incrementos en el contenido de fibras la trabajabilidad de la mezcla se ve reducida. A su vez, se tiene incremento en la resistencia a la flexión. En los especímenes con contenidos de 0.05% y 0.18% se tienen resultados similares entre sí (ambos superiores al concreto sin fibras), mientras que los especímenes con contenido de 0.30% se tuvo un incremento del 19.2% ensayado a 28 días.
Ramadevi y Manju (2012)	Investigación experimental en las propiedades del concreto con fibras de plástico de PET (botellas) como agregado fino	Esta investigación buscó la posibilidad de manejar desechos de PET como un reemplazo parcial de agregados. Concreto con 0.5%, 1%, 2%, 4% y 6% reemplazando agregados finos por fibras de PET fue fabricado. Se realizaron ensayos de compresión, tensión y flexión a especímenes con edades de 7 y 28 días.	La resistencia a la flexión de especímenes con reemplazo de agregado fino por fibras de PET tuvo incrementos graduales respecto al incremento en el porcentaje de reemplazo. Fue notable ver que en el cambio de 4% a 6% la resistencia tiene un incremento mínimo, permaneciendo casi estable. El valor de sustitución en el cual se tuvo un mayor incremento fue en el 2%.

Pereira <i>et al.</i> (2017)	Optimización de propiedades mecánicas en concreto armado con fibras de residuos sólidos urbanos (PET) para la producción de concreto ecológico	Se moldearon 66 piezas para ensayos curadas a 28 días, las cuales se diferenciaron por la longitud de las fibras, el contenido que se añadió a la mezcla afectando así el volumen y peso que ocupaban en ella	Se obtuvieron aumentos en la resistencia a la tensión en el concreto ecológico. Se aumento la eficiencia en un valor mayor al 22% al añadirse fibras en una cantidad de 0.06% con longitudes mayores a 24 mm
Lima <i>et al.</i> (2014)	Caracterización y tratamiento de residuos de fibra de sisal para aplicación compuesta basada en cemento	La incorporación de residuos de fibra de sisal para su uso en materiales hechos a base de cemento fue investigada. La compatibilidad con la matriz basada en cemento se evaluó mediante una prueba de extracción de fibra y prueba de flexión en compuestos reforzados con 2% de residuos	La adición de fibra de sisal no tratada, chatarra o arbusto de campo aumentó la resistencia a la flexión en aproximadamente 24%, 65% y 16%, en comparación con el concreto de referencia, respectivamente
Nobili <i>et al.</i> (2013)	Investigación experimental y vigilancia de un pavimento de concreto reforzado con fibra de polipropileno	Se aplica concreto hecho a base de fibras de polipropileno como pavimento en una sección de pruebas que está dentro de un túnel del tramo de la carretera "Cuadrilatero Marche-Umbría" Italia. Los resultados de un seguimiento de seis meses sobre cargas reales de tráfico.	Se muestra que los niveles de deformación en el pavimento descansan muy cerca de la condición inicial de pre-servicio y son bastante consistentes en espacio y tiempo. En particular, un efecto beneficioso de relajación de la tensión dominó las lecturas registradas.

Roh et al. (2015)

Caracterización de la compilación de concretos poliméricos para la reparación rápida de pistas	Para mejorar la conformidad del concreto polimérico con base de epoxi, se reemplazó una resina epoxi por caucho de silicona de tipo líquido o polvo residual de neumático. Las pruebas de flexión siguieron el estándar de prueba ASTM C580-02	Al incrementar la goma de silicona, la resistencia a la flexión disminuyó en los especímenes con un 80:17:03 y 80:15:05 (Agregado: epoxy: caucho) en un 15.2% y 22.6% respectivamente. Los especímenes 72:20:08 (T) y 70:20:10 (T) presentaron deflexión máxima del 56.8% y 82.9%, respectivamente, que el concreto polimérico estándar, pero los decrementos de las resistencias a la flexión fueron insignificantes (6,8% y 14,5%, respectivamente). Esto significa que cantidades más altas de polvo de residuo de neumático indujeron una deflexión máxima más alta, dando como resultado una energía de deformación más alta (área más alta de la curva de tensión-deflexión).
------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, de los resultados obtenidos de las investigaciones en las cuales se agregaron polímeros, se hace notar que las resistencias a flexión

fueron modificadas a favor, presentando incrementos significativos. Si bien, en la investigación desarrollada por Lima *et al.* (2014) no se utilizaron polímeros, dadas las características de la fibra de sisal, se mejoraron las propiedades a flexión, lo cual se traduce que, al añadir materiales elásticos en proporciones reguladas, el concreto hidráulico se verá reforzado por la adición de estos a su contenido.

2.3 El plástico y su reciclaje

El plástico se ha convertido en parte esencial de la vida moderna (Mahdi *et al.*, 2007). Es ampliamente utilizado en diferentes campos como el automotriz, en la construcción, en electrónica, agricultura y embalaje (Gu y Ozbakkaloglu, 2016). En este último mencionado, el polietileno tereftalato (PET), el cual es un poliéster saturado (Elgegren y Nakamatsu, 2009), es frecuentemente utilizado (Farahat, 2002) porque tiene propiedades únicas como una baja densidad, alta relación resistencia/dureza (Pereira *et al.*, 2017), alta durabilidad y resistencia a agentes químicos (Atta *et al.*, 2005 y George Kurian, 2014). De manera general, los polímeros presentan propiedades mecánicas particulares, como es explicado en Sun *et al.* (2017), diversos materiales compuestos por polímeros presentan recuperación en su forma original, después de haber experimentado una deformación al reaccionar a diferentes estímulos provocados.

Es esperado que el consumo mundial de PET para embalaje crecerá arriba de las 20 Mt en el 2019 (Drah *et al.* 2016). Esta proliferación posee serios problemas económicos y ambientales, que requieren del reciclaje del PET (Imran *et al.*, 2010). Por estas razones existen diferentes métodos de reciclaje de PET, los cuales pueden ser divididos en 4 grupos: re-extrusión, mecánicos, químicos y por recuperación de energía (Cata *et al.*, 2015). De acuerdo con Bartolome *et al.*, (2012) y con base en los principios de desarrollo sustentable, el único método de reciclaje aceptable es el procedimiento químico, ya que este permite la formación de materias primas de las cuales el PET fue originalmente fabricado. El reciclaje químico involucra la conversión

de la cadena del polímero, el cual es despolimerizado en unidades de monómeros unidos con oligómeros (Sheel y Pat, 2019). Dependiendo del agente de depolimerización, el reciclaje químico del PET puede llevarse a cabo por hidrólisis, glicólisis, metanolisis, aminólisis y amonólisis (Sinha *et al.*, 2008).

Es sugerido que el método mas atractivo es la glicólisis, ya que permite la formación de monómeros o sustancias químicas nuevas que pueden ser empleadas en la producción de plásticos nuevos u otros materiales avanzados (Suh *et al.*, 2000) y por otro lado, los procesos que involucran la metanolisis y la hidrólisis son desarrollados en ambientes de temperatura y presión más elevados a como se hace en la glicólisis y además, debido a las condiciones ácidas o básicas de la hidrólisis, esta puede generar problemas ambientales (Xi *et al.*, 2005). En palabras de Sinha *et al.* (2008), la reacción de glicólisis es la degradación molecular del polímero del PET por los glicoles, en presencia de catalizadores de transesterificación, donde los enlaces de éster se rompen y se reemplazan con terminales hidroxilo. Con este procedimiento es posible obtener una resina llamada BHET que, cuando se agrega a la matriz cementante, puede contribuir a mejorar la microestructura del concreto debido a que la interacción de las partículas del polímero y los hidratos del cemento genera una película que afecta positivamente el rendimiento del material (Giustozzi, 2016).

3. Metodología

Por medio de la siguiente investigación se pretende realizar un concreto polimérico que supere las propiedades mecánicas de un concreto hidráulico común, haciendo énfasis en la propiedad mecánica de resistencia a la flexión, y por consiguiente, diseñar una mezcla que tenga el potencial para ser implementada como material para pavimento rígido.

3.1 Diagrama de la metodología

Para alcanzar los objetivos mencionados, se seguirán los pasos descritos en la figura 4.

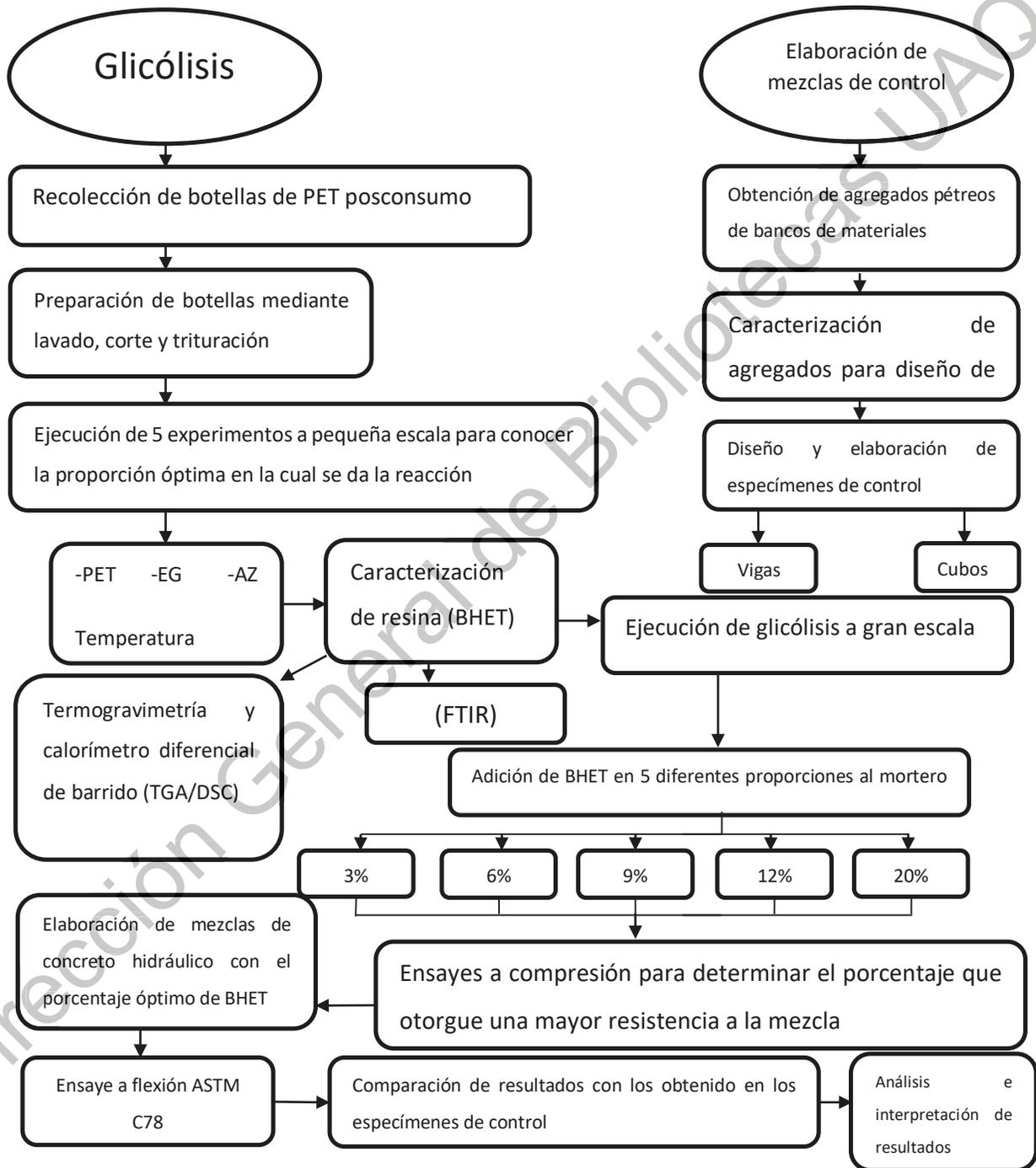


Figura 4. Representación esquemática de la metodología

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Depolimerización química

Los homopolímeros son aquellos polímeros que están formados por el mismo monómero a lo largo de toda su cadena de composición. Pertenecientes a esta familia se encuentran grupos de polímeros sintéticos y naturales. En el grupo de los sintéticos se pueden encontrar el polietileno tereftalato, el cloruro de polivinilo y en el grupo de los polímeros naturales la celulosa y el caucho. Para el caso en particular, la procedencia de los homopolímeros a emplear en la mezcla de concreto hidráulico será de la acumulación de botellas de plástico que ya han sido utilizadas como recipientes de embalaje. El polietileno tereftalato es un poliéster termoplástico importante producido por la esterificación del ácido tereftálico (TPA) con etilenglicol (EG). La glicólisis involucra la inserción de un diol en la cadena del PET para producir bis-2-hidroxiethyltereftalato (BHET) como uno de los productos principales de la reacción. El BHET puede ser fácilmente utilizado en la producción de PET virgen (Herrera y Estrada 2012). Por medio de la depolimerización del PET se obtendrá BHET, material que podrá ser moldeado y extruido, que, aunque tendrá propiedades mecánicas inferiores a las del polietileno tereftalato al no ser un material virgen, dará a la mezcla de concreto una mejora a la microestructura de este.

Para llevar a cabo la depolimerización primeramente se realizará una recolección de botellas de PET posconsumo, provenientes de basureros o centros de recolección. Será necesario lavarlas adecuadamente para que estas sean cortadas por medio de un molino, obteniendo hojuelas de PET y que así realizar la reacción de glicólisis. Para efectuarla, se podrá seguir parte de los procedimientos descritos en el trabajo de Herrera y Estrada (2012), como se describe a continuación:

La reacción de depolimerización mediante glicólisis catalizada se llevará a cabo a la temperatura de ebullición del glicol (197°C) en presencia de acetatos metálicos como catalizadores y un exceso de glicol. Una cantidad conocida de PET posconsumo será mezclada con un el glicol seleccionado y el catalizador. La mezcla de reacción se calentará a 197–200°C en un matraz de fondo redondo con tres bocas de 250 ml, durante 10 horas para las reacciones no catalizadas y por 2,5 horas para las catalizadas con acetatos metálicos; posteriormente se dejarán enfriar a temperatura ambiente. El glicol para emplear serán etilenglicol (EG). Para separar el BHET de la mezcla de reacción, el producto de la reacción de glicólisis será destilado para concentrar el BHET y remover el exceso de glicol. El catalizador utilizado será acetato de cinc. El producto seco de las reacciones catalizadas y no catalizadas será caracterizado mediante FT-IR, utilizando un espectrofotómetro, un calorímetro diferencial de barrido, DSC, y un analizador termogravimétrico, TGA. El glicol consumido en la reacción de glicólisis podrá ser determinado como la diferencia entre el contenido de glicol libre en la muestra de PET incluyendo el glicol adicionado antes y después de la reacción de glicólisis del PET post-consumo.

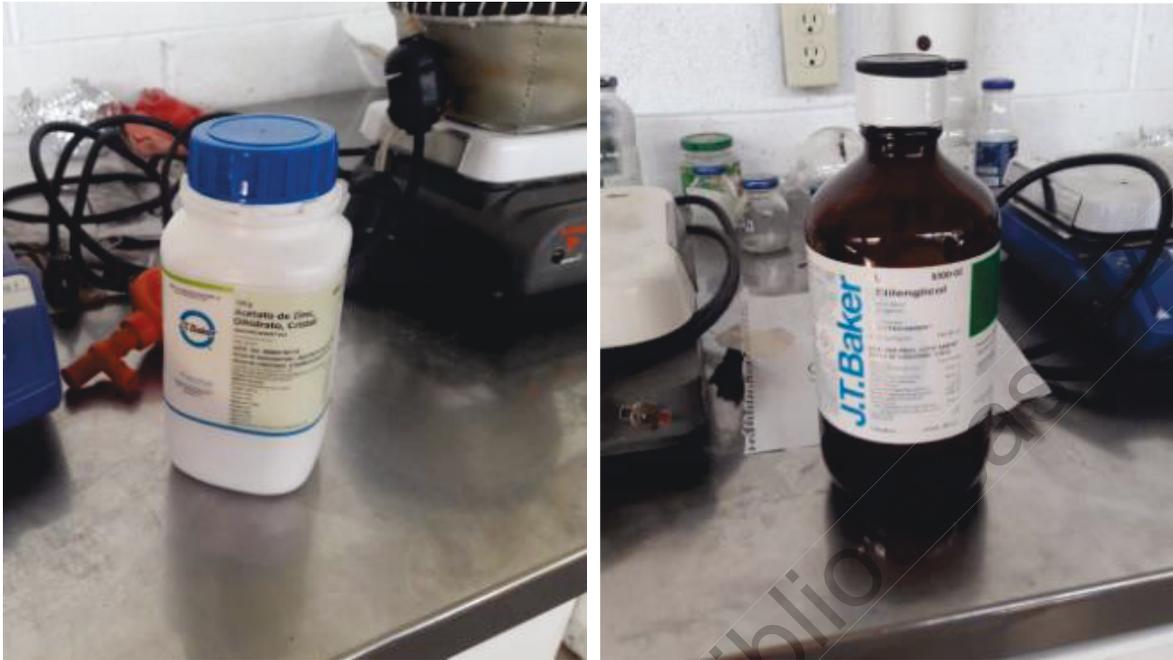


Figura 5. Reactivos en un estado de pureza de 99.9% a emplear para la glicolisis.

3.3 Elección de los agregados pétreos y caracterización

El concreto hidráulico se compone de agregados pétreos, agua y cemento. De acuerdo con McGinnis *et al.* (2017), los agregados gruesos corresponden entre el 40-50% del volumen total de la mezcla, por lo que habrá de tenerse especial cuidado en su selección para obtenerse un concreto de alta calidad. Posterior a la obtención de los agregados será necesaria la caracterización de estos, primeramente, serán obteniendo las granulometrías de acuerdo con lo descrito con la normatividad ASTM C136, para posteriormente seguir lo descrito en la normatividad ASTM C29 para la obtención de los pesos volumétricos.

Para poder hacer la dosificación de la mezcla será necesario conocer las densidades y absorciones de los materiales, todo ello siguiendo la normatividad ASTM C127 y ASTM C128.

Contando con los parámetros de caracterización claves para el diseño de mezclas será necesario conocer la calidad del material y hacer un comparativo con los límites establecidos en la normatividad para el desarrollo de mezclas de concreto hidráulico. Para ello, será necesario obtener el módulo de finura y los límites de Atterberg de la arena y de la fracción fina de la arena respectivamente. Para ello será necesario seguir lo establecido en las normas ASTM D2419 y ASTM D4318, para que una vez que dichos valores sean obtenidos se consulte con la solicitado por la normatividad para ver si los materiales cumplen para su empleo en mezclas de concreto hidráulico.

3.4 Diseño de mezclas de concreto hidráulico y mortero con diferentes proporciones

De acuerdo con Olivera (1986), las mezclas de los materiales en el concreto hidráulico se hacen con el fin de obtener una resistencia deseada, una densidad óptima y una manejabilidad en estado fresco. Por ello, se hará el diseño de una mezcla de concreto para pavimento de acuerdo con el método ACI-211.1, con un módulo de ruptura de 48 kg/cm² como mínimo. Para el mortero hidráulico se seguirá la dosificación dada en la normatividad mexicana NMX-C-061-ONNCE-2001.

3.5 Ensayos para la evaluación de la calidad de las mezclas

De acuerdo con Huang (2004) los esfuerzos generados en las losas de concreto que se desempeñan como pavimento son principalmente de compresión y flexión. En Choi y Yuan (2005) se argumenta que la resistencia a la tensión del

concreto representa solo el 10% de su resistencia a la compresión. Por tal motivo el pavimento debe diseñarse principalmente en función a la resistencia a la flexión.

La resistencia de diseño especificada a la tensión por flexión (S'_c) o Módulo de Ruptura (M_R) a los 28 días, se verificará en especímenes moldeados durante el colado del concreto, correspondientes a vigas estándar de quince por quince por cincuenta (15 x 15 x 50) centímetros, compactando el concreto por vibro compresión y una vez curados adecuadamente, se ensayarán a los y 28 días aplicando las cargas en los tercios del claro de acuerdo con lo dicho en ASTM C 78.

En la tabla 11 se muestran los valores de módulo de ruptura recomendados según la utilidad del pavimento a diseñar. Cabe mencionar que el diseño debe basarse en un criterio amplio que considere todas las variables que influyen en el mismo.

Tabla 11. Módulos de ruptura sugeridos de acuerdo con el tipo de vialidad

Tipo de Pavimento	MR recomendado	
	MPa	psi
Autopistas	4.70	682.7
Carreteras	4.70	682.7
Zonas industriales	4.41	640.1
Urbanas principales	4.41	640.1
Urbanas secundarias	4.12	597.4

Fuente: CEMEX (2001) Manual de diseño y construcción de pavimentos de concreto.

El Módulo de Elasticidad del concreto está íntimamente relacionado con su Módulo de Ruptura y se determina mediante la norma ASTM C469. Existen varios

criterios con los que se puede estimar el Módulo de Elasticidad a partir del Módulo de Ruptura. Los dos más utilizados son se muestran en las ecuaciones 2 y 3:

$$EC = 6750 * MR \quad (2)$$

$$EC = 26454 * MR^{0.77} \quad (3)$$

Estas fórmulas aplican con unidades del Sistema Inglés.

Para evaluar la resistencia a la compresión simple, se seguirá lo descrito en la norma ASTM C109 denominada “Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico”. Los ensayos serán elaborados a los 28 días de curado y del valor que se obtenga una mayor resistencia, se replicará el experimento haciendo la evaluación a los 7 y los 14 días.

Se tiene contemplada la realización de 3 ensayos de las pruebas descritas, con respectivas combinaciones de 3%,6%,9%,12% y 20% de contenido de polímeros del peso total del cemento empleado para cada uno de los especímenes, haciendo una sustitución de este por el polímero. Sin embargo, cabe la posibilidad de realizar un mayor número de ensayos, los cuales se definirán con base en los resultados obtenidos de los primeros ensayos mencionados.

Todas las mezclas con las diferentes proporciones de polímero serán hechas de la misma manera que sea realiza una mezcla de concreto hidráulico convencional, esto es, mediante la adición de agua y cemento a los agregados gruesos y finos creando así una mezcla, para posteriormente añadir el porcentaje de polímero, antes de que se dé el fraguado, para cada uno de los especímenes a ensayar. Una vez contenido el polímero en la mezcla en estado fresco, se revisará el revenimiento de acuerdo con lo descrito en la norma ASTM C14, para tener seguridad de que la

trabajabilidad obtenida sea la adecuada, considerando que la finalidad será para su aplicación como superficie de rodadura.

En la tabla 12 se hace un concentrado del número de pruebas a realizar, así como el número de repeticiones para cada una de estas.

Tabla 12. Concentrado de la cantidad de pruebas y las repeticiones a realizar para cada una de estas

Pruebas por realizar	Contenido de polímeros para cada mezcla				
	3%	6%	9%	12%	20%
	Número de repeticiones para cada prueba				
ASTM C109 (28 días)	3	3	3	3	3
ASTM C109 (14 días)	-	-	-	-	-
ASTM C78 (28días)	-	-	-	-	-
ASTM C143	3	3	3	3	3

Nota: Las pruebas ASTM C109 a 14 días y ASTM C78 serán definidas con base en los resultados obtenidos de los ensayos realizados en la prueba ASTM C109 a 28 días

Fuente: elaboración propia

3.6 Análisis e interpretación de resultados

Terminada la etapa experimental, se realizará una recopilación de los resultados obtenidos, con el fin de desarrollar un análisis de los resultados, agrupando cada una las resistencias alcanzadas de las 3 repeticiones, según la prueba, con su respectivo porcentaje de polímero. Por medio de la revisión de los datos será posible determinar qué porcentaje de polímero otorga la mayor resistencia en cuestiones de flexión y compresión, cumpliendo también con las condiciones de revenimiento del concreto.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de los agregados

Los agregados pétreos involucrados en la creación de las mezclas de concreto y mortero fueron obtenidos de los bancos de materiales “Lindavista” ubicado en el estado de Querétaro (agregado fino) y “Las Brujas” ubicado en el estado de Guanajuato (agregado grueso), ambos pertenecientes al Inventario Nacional del Banco de Materiales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. En la figura 6 se muestra el agregado grueso obtenido en el banco de materiales “Las Burjas”.



Figura 6. Muestreo en el banco de materiales pétreos “Las brujas”

Se realizó la caracterización de los agregados gruesos y finos de acuerdo con lo descrito en la normatividad ASTM. Es importante mencionar que fueron obtenidos 2 tipos de grava, muestreados en el mismo banco de materiales, pero obtenidos de dos clasificaciones diferentes, mencionados en de aquí en adelante como “grava 1” correspondiente a una grava con TMA de 1 ½” y “grava 2” con TMA

de $\frac{3}{4}$ ". El motivo por el cual se tomaron 2 muestras diferentes de grava fue para poder hacer un diseño granulométrico con una distribución de partículas acorde a lo solicitado para el diseño de mezclas de concreto hidráulico.

El primer procedimiento realizado para la caracterización de los agregados fue la obtención de las curvas granulométricas de acuerdo con lo descrito en normatividad ASTM C136. En la figura 7 se aprecia la separación de los agregados gruesos. En la figura 8 se muestra el cribado de los agregados finos.



Figura 7. Preparación del agregado grueso para la realización del análisis granulométrico



Figura 8. Cribado del agregado fino para la obtención de la curva granulométrica

Una vez realizados los procedimientos de cribado fueron obtenidas las siguientes distribuciones de partículas mostradas en las tablas 13,14 y 15.

Tabla 13. Granulometría obtenida para la grava 1.

Granulometría Grava 1						
Masa de la muestra=	37.35 kg					
Tamiz (plg)	Diámetro (mm)	Masa retenida (kg)	retenido (%)		% que pasa	
			parcial	acumulado		
2	50.8	0	0.00%	0.00%	100.00%	
1 1/2	38.1	1.63	4.36%	4.36%	95.64%	
1	25.4	17.85	47.79%	52.16%	47.84%	
3/4	19.05	10.89	29.16%	81.31%	18.69%	
1/2	12.7	5.94	15.90%	97.22%	2.78%	
3/8	9.525	0.55	1.47%	98.69%	1.31%	
1/4	6.35	0.15	0.40%	99.09%	0.91%	
No. 4	4.75	0.05	0.13%	99.22%	0.78%	
Pasa No. 4	--	0.12	0.32%	99.54%		

Fuente. Elaboración propia

Tabla 14. Granulometría obtenida para la grava 2.

Granulometría Grava 2						
Masa de la muestra=		48.87 kg				
Tamiz (plg)	Diámetro (mm)	Masa retenida (kg)	Retenido (%)		% que pasa	
			parcial	acumulado		
2	50.8	0	0.00%	0.00%	100.00%	
1 1/2	38.1	0	0.00%	0.00%	100.00%	
1	25.4	0	0.00%	0.00%	100.00%	
3/4	19.05	5.27	10.78%	10.78%	89.22%	
1/2	12.7	17.42	35.65%	46.43%	53.57%	
3/8	9.525	10.89	22.28%	68.71%	31.29%	
1/4	6.35	9.33	19.09%	87.80%	12.20%	
No. 4	4.75	3.71	7.59%	95.40%	4.60%	
Pasa No. 4	--	2.25	4.60%	100.00%		

Fuente. Elaboración propia

Tabla 15. Granulometría obtenida para la arena

Granulometría Arena						
Masa de la muestra=		592 gr				
Tamiz (plg)	Diámetro (mm)	Masa retenida (gr)	Retenido (%)		% que pasa	
			parcial	acumulado		
3/8	9.525	0	0%	0%	100%	
No. 4	4.75	91.4	15.44%	15.44%	84.56%	
No.8	2.36	248.85	42.04%	57.47%	42.53%	
No. 16	1.18	151.79	25.64%	83.11%	16.89%	
No. 30	0.6	45.33	7.66%	90.77%	9.23%	
No. 50	0.3	16.88	2.85%	93.62%	6.38%	
No. 100	0.15	10.85	1.83%	95.46%	4.54%	
No. 200	0.075	11.46	1.94%	97.39%	2.61%	
Pasa No. 200		12.4	2.09%	99.49%		

Fuente. Elaboración propia

De estas tablas fue posible graficar los resultados para obtener las curvas granulométricas mostradas en las figuras 9, 10 y 11.

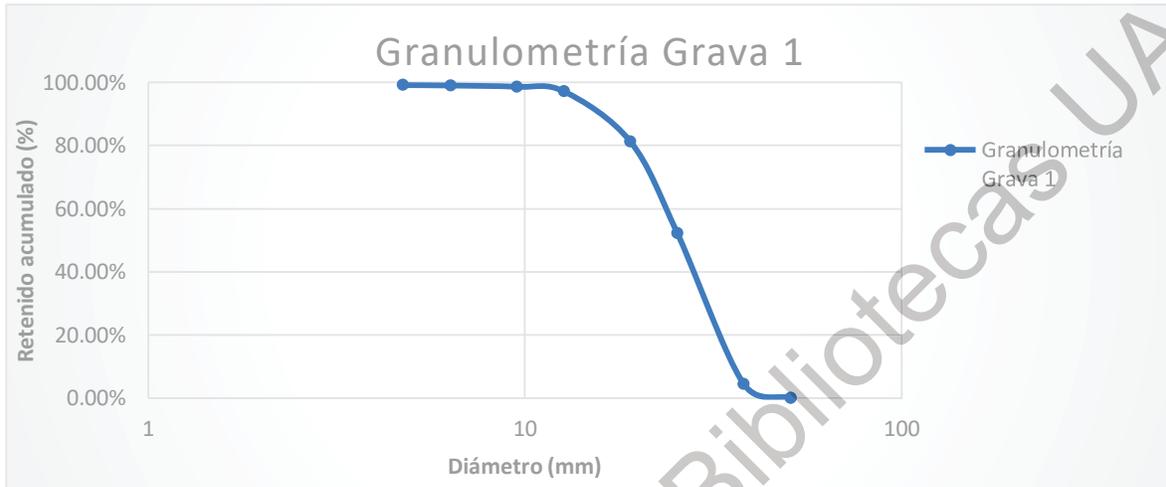


Figura 9. Curva granulométrica obtenida para la grava 1

Fuente. Elaboración propia

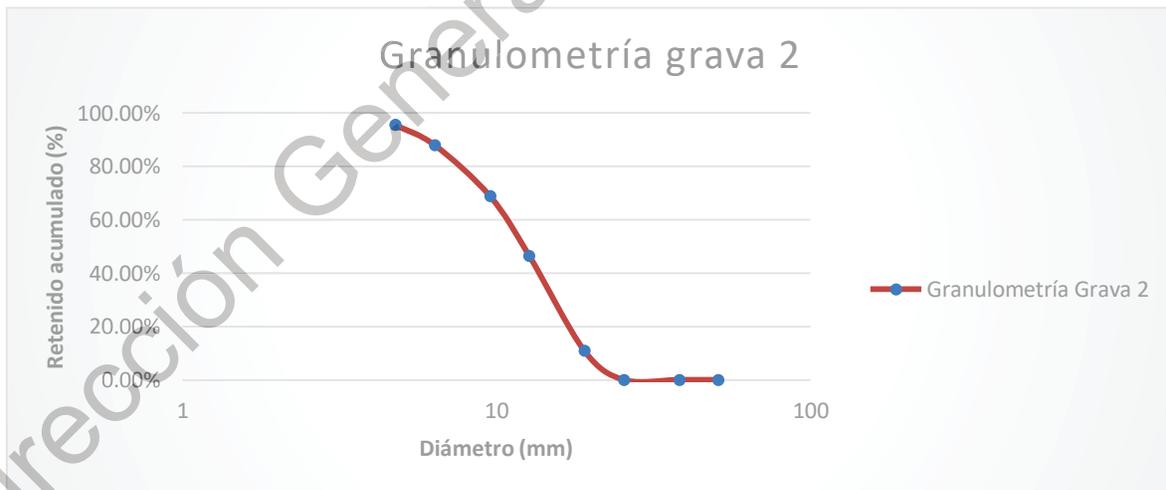


Figura 10. Curva granulométrica obtenida para la grava 2

Fuente: Elaboración propia

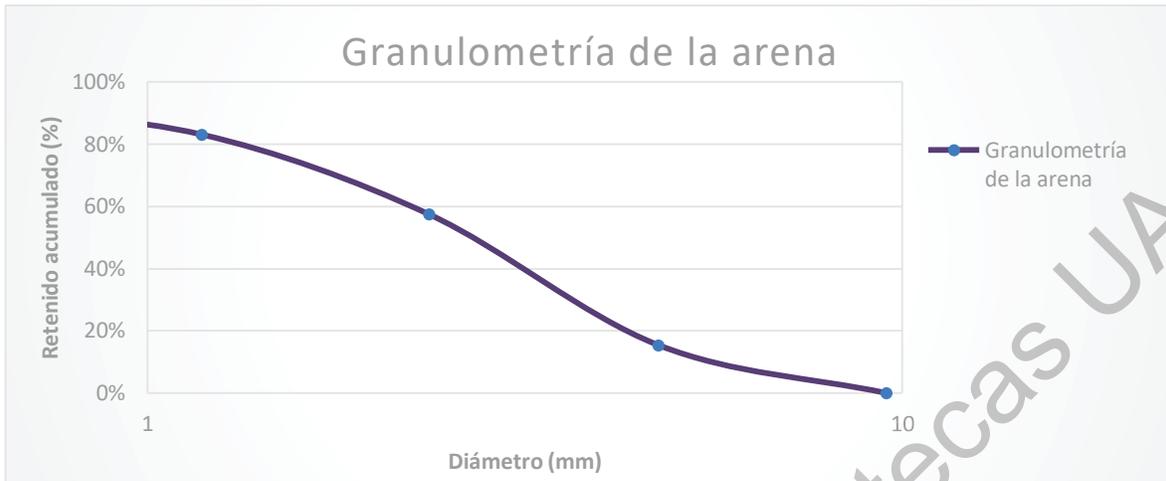


Figura 11. Curva granulométrica obtenida para la arena

Fuente. Elaboración propia

Los resultados obtenidos de la clasificación del SUCS para estos materiales fue de *GP* para ambas gravas y *SP* para la arena, lo cual indica que no hay una distribución uniforme entre los diferentes tamaños de partículas de las que es compuesto el material. De los resultados obtenidos fue posible hacer una combinación de los 3 materiales para obtener un material que cumpliera con los requisitos mencionados en la norma mexicana N-CMT-2-02-002/02.

Posterior a esto se realizaron los procedimientos descritos en la norma ASTM C29 para obtener los pesos volumétricos (kg/m^3) de los 3 materiales descritos. Para ello fue necesario primeramente hacer el cuarteo del material, tal como es descrito en la norma, para obtener una muestra que sea representativa del mismo, como es mostrado en las figuras 12 y 13.



Figura 12. Cuarteo de la grava 1



Figura 13. Cuarteo de la arena

Teniendo el material cuarteado se procedió a hacer el llenado de las correspondientes cubetas de peso volumétrico de gravas y arenas, como es mostrado en la figura 14.



Figura 14. Obtención de la masa de la grava 2 para el cálculo del peso volumétrico

Una vez desarrollados los procedimientos descritos fue posible obtener el peso volumétrico para los 3 materiales muestreados, mostrados en la tabla 16.

Tabla 16. Pesos volumétricos obtenidos para los agregados gruesos y finos muestreados

Peso volumétrico (kg/m ³)	
Grava 1	1452
Grava 2	1515
Arena	1472

Fuente. Elaboración propia

De estos resultados es posible concluir que los materiales se encuentran con valores dentro del promedio establecido para materiales provenientes de rocas sanas y se obtuvieron a través de la trituración, tal y como se especificó en los bancos donde se obtuvieron estos 3 materiales. Posterior a esto, fueron calculadas las densidades y absorciones que los materiales presentaban, parámetros claves a conocer para elaborar el diseño de mezclas y se estime una relación correcta de agua/cemento. Dichos parámetros fueron seguidos por lo descrito en las normas ASTM C 127 y ASTM C 128. En la figura 15 se puede apreciar parte del procedimiento para conocer la densidad de la arena. En la figura 16 se muestra la arena en su estado saturado y superficialmente seco para conocer su valor de absorción.



Figura 15. Determinación de la densidad de la arena



Figura 16. Arena es estado saturado y superficialmente seco para el cálculo de su absorción

Mediante estos procedimientos fue posible obtener los resultados mostrados en la tabla 17 referentes a densidades y absorciones de los 3 agregados a emplear.

Tabla 17. Resultados de densidad y absorción obtenidos para los materiales muestreados.

	Densidad	Absorción
Grava 1	2.76	2.07%
Grava 2	2.8	1.63%
Arena	2.468	4.69%

Fuente. Elaboración propia

Enseguida, fue elaborado el procedimiento para la obtención del equivalente de arena siguiendo los pasos descritos en la norma ASTM D2419 desarrollado con un equipo de equivalente de arena. En la figura 17 se muestra parte de este procedimiento.



Figura 17. Procedimiento para la obtención del equivalente de arena

De lo desarrollado se obtuvo que el equivalente de arena de la muestra es de 84.61%, valor favorable que indica que las partículas finas de la muestra en relación con las arenas son muy pocas. De igual manera, se desarrolló lo descrito en la norma ASTM D4318 para obtener el límite líquido, plástico y contracción lineal. En las figuras 18 y 19 se ve el parte del procedimiento para conocer el límite líquido y la contracción lineal respectivamente.



Figura 18. Determinación del límite líquido por medio de la copa de Casagrande



Figura 19. Determinación de la contracción lineal

No fue posible obtener un límite plástico, por las propiedades del material, ya que, al no presentar plasticidad, no fue posible elaborar lo descrito en las normas para

la determinación de este parámetro. De todo lo anterior, se presenta en la tabla 18 el resumen de resultados obtenidos para las pruebas descritas.

Tabla 18. Resultados obtenidos para la obtención del límite líquido.

Límite Líquido con Copa de Casagrande

Flaneras	Peso de flanera (gr.)	Flan. + muestra (gr.)	Flan+mat. Seco (gr.)	Humedad (%)	No. De Golpes
166	127.86	139.79	137.4	25.1%	18
31	125.92	135.18	133.5	22.2%	30
13	129.56	139.21	137.1	28.0%	4
39	127.34	136.77	134.8	26.4%	7

Fuente. Elaboración propia

De la tabla 18 se elaboró la gráfica mostrada en la figura 20.

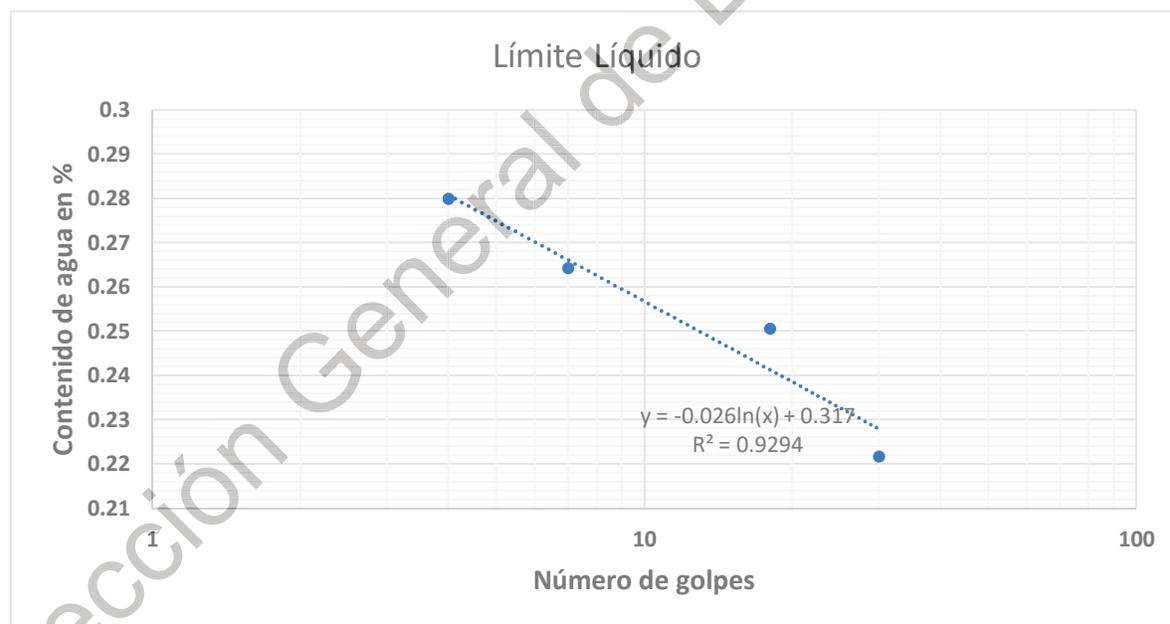


Figura 20. Gráfica y ecuación para la determinación del límite líquido

De todo lo desarrollado se expresa un resumen de los resultados obtenidos en la tabla 19. Al presentar un límite líquido bajo (menor al 25%) y un límite plástico nulo es posible determinar que la arena puede ser empleada en una mezcla de concreto hidráulico.

Tabla 19. Resumen de resultados obtenidos para límite líquido, límite plástico y contracción lineal de los finos encontrados en la arena.

Resultados	
LL=	23.3%
LP=	NP
CL=	0.98%
R ²	0.92

Fuente. Elaboración propia

4.2 Depolimerización química

La obtención de los desechos plásticos se hizo a través de la recolección de contenedores de basura, así como de desechos residuales ubicados en las calles. Para poder hacer la depolimerización fue necesaria la limpieza minuciosa de las botellas de PET, tal y como se muestra en la figura 21.

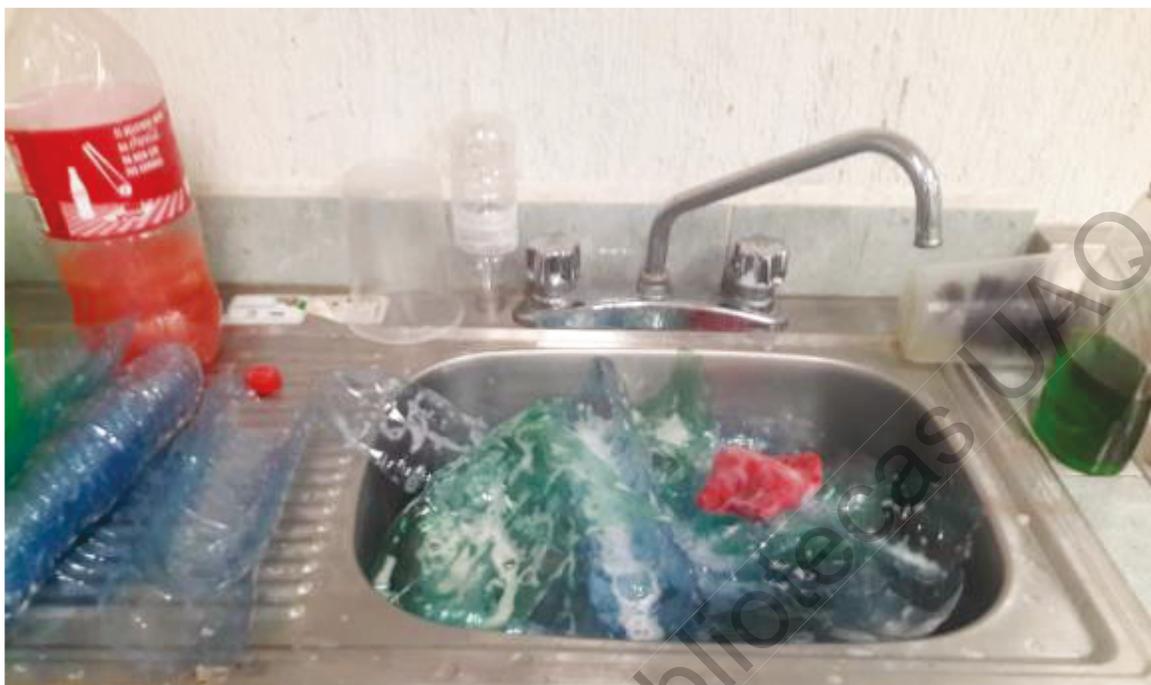


Figura 21. Limpieza de las botellas de PET.

Previo a la limpieza, fue necesaria la preparación del material para ser introducido al molino de pulverización. Dicha preparación consistió en la separación de la boquilla y la base de la botella, ya que estos materiales no se conforman de PET. Estos materiales fueron almacenados correctamente para su reutilización en una investigación diferente, como es mostrado en la figura 22.



Figura 22. De lado izquierdo se tiene el almacenamiento de desechos producidos por la preparación del PET. De lado derecho se tienen las botellas listas para ser introducidas al molino para su pulverización

El PET fue cortado por un molino modelo Conair Martin CL 912. El proceso de molienda se realizó en dos ciclos. En el primero, se obtuvieron escamas de 12 mm (Figura 23, A) y en el segundo se obtuvo el tamaño definitivo de 4 mm para llevar a cabo la glicolisis (Figura 23, B).

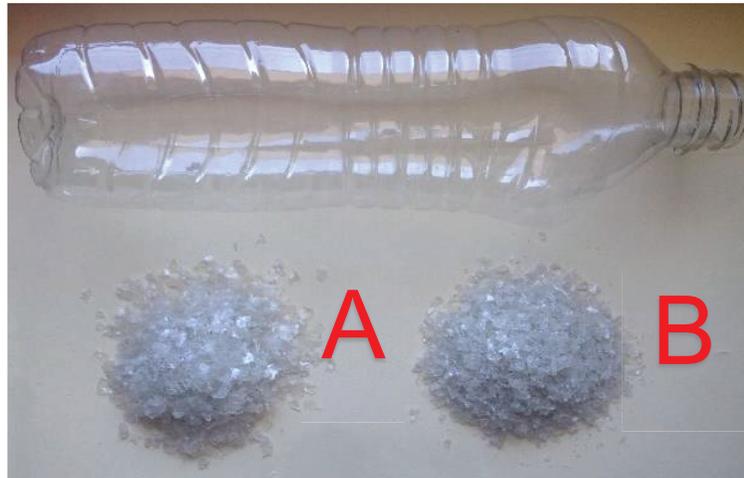


Figura 23. Botella de PET reciclada y hojuelas obtenidas del proceso de molienda.

El etilenglicol se utilizó para llevar a cabo la glicolisis, ya que según el estudio de Herrera y Estrada (2012), este es el glicol que proporciona un rendimiento más alto en comparación con otros como el propilenglicol y el dietilenglicol. Como catalizador, se usó acetato de zinc, porque en el estudio desarrollado por Elgengen y Nakamatsu (2009) este catalizador muestra un mejor rendimiento que el bicarbonato de sodio. Los reactivos de alta pureza obtenidos de Aldrich se usaron para realizar el primer experimento, que se realizó con el propósito de conocer la proporción adecuada de etilenglicol / PET / acetato de zinc, así como para conocer el tiempo de reacción en el proceso de glicolisis. El segundo experimento fue a gran escala, se utilizaron reactivos de grado industrial para realizar la reacción y obtener la resina de BHET utilizada en el experimento global. El experimento a pequeña escala se realizó con el propósito de conocer la proporción adecuada de etilenglicol / PET / acetato de zinc, así como conocer el tiempo de reacción en el proceso de glicolisis y los instrumentos que pudieran llegar a ser necesarios para reproducir el experimento a mayor escala y generar la resina. Al mismo tiempo, el propósito del experimento a pequeña escala se realizó para saber si la resina obtenida era BHET. Por lo tanto, a partir de la resina obtenida de esta reacción, se realizó el análisis FTIR y TGA / DSC.

La Tabla 20 muestra los diferentes resultados de acuerdo con las variaciones en el tiempo de reacción, la cantidad de catalizador y el equipo implementado.

Tabla 20. Conjunto de experimentos a pequeña escala realizados. PET 1 * se realizó sin catalizador.

Número de prueba	Catalizador (% w/w)	Glicol (ml)	Tiempo de reacción (horas)	Rendimiento (%)
PET 1*	0	33.5	12	72
PET 2	0.75	40	3.5	55
PET 3	0.75	40	4	58
PET 4	1	40	3	70
PET 5	1.2	40	2.5	75
PET 6	1.5	40	2.5	80

Fuente. Elaboración propia

El experimento a pequeña escala se realizó mediante un matraz de dos vías, en el que se mezclaron PET, altos niveles de etilenglicol y acetato de zinc. Se calentó en el rango de 180 a 220 ° C por medio de una estufa eléctrica en diferentes rangos de tiempo, que variaron de 2 a 12 horas, dependiendo de la cantidad de acetato de zinc. El matraz se envolvió en una manta térmica para generar una distribución de calor uniforme y de ese modo aumentar la eficiencia en la reacción. En la segunda salida, se conectó a un tubo de destilación para capturar la resina producida por la reacción en el matraz, que se enfrió constantemente con agua en recirculación. El producto obtenido se caracterizó mediante espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR). El experimento a pequeña escala otorgó la dosificación que mostró el mayor rendimiento (PET 6) y estas cantidades fueron tomadas para hacer la producción de BHET a gran escala, la cual se desarrolló en un recipiente metálico sellado en su totalidad, con una salida para la absorción de la resina por medio de destilación. La producción a gran escala otorgó

900 ml de resina por lote. El análisis FTIR se ha utilizado para estudiar la reactividad química y las propiedades físicas de los polímeros a nivel molecular (Chen y Jenkins 2012). En la Figura 24, se muestra una comparación entre los espectros FTIR de escamas de botellas de PET post consumo en azul, antes de la reacción de despolimerización y BHET en negro, muestra obtenida después de la reacción de despolimerización por glicolisis catalizada.

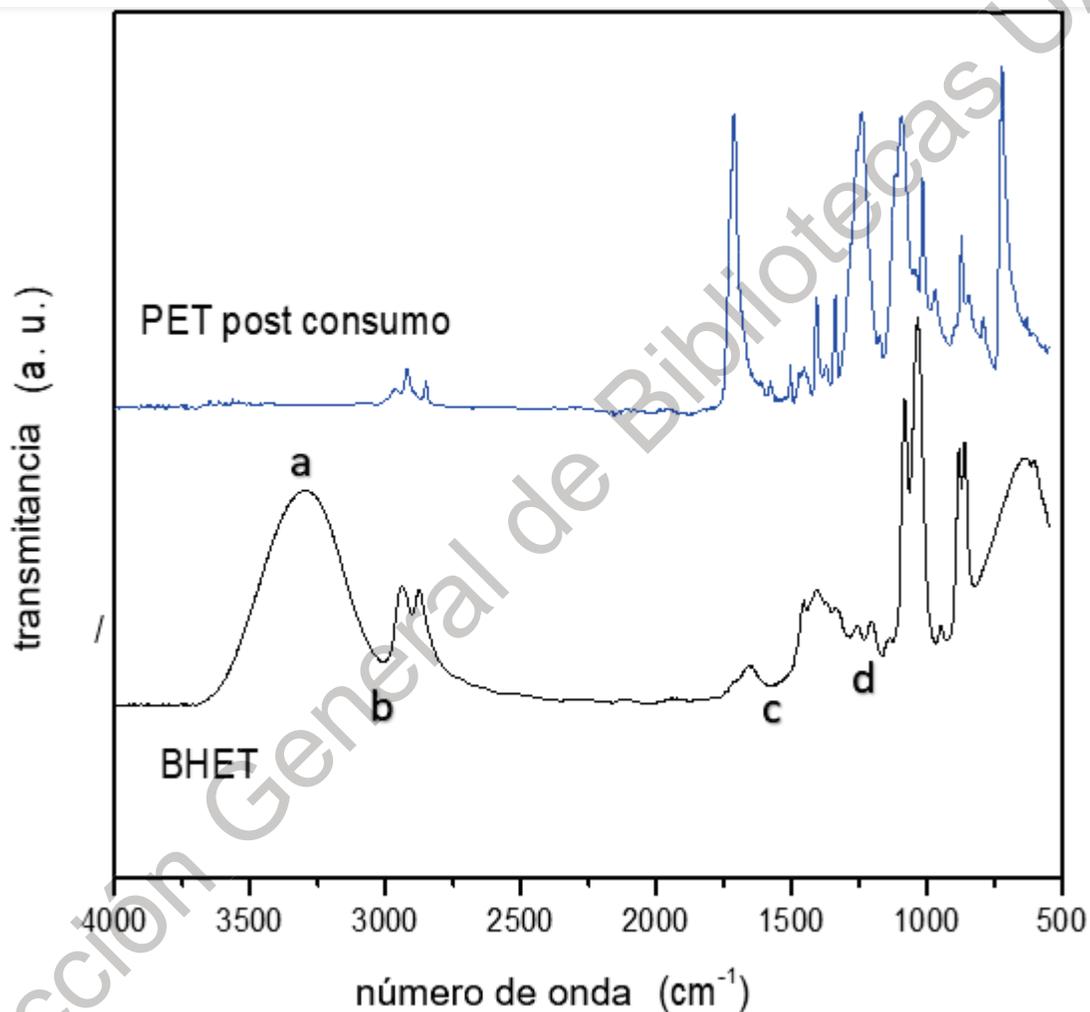


Figura 24. Espectro FTIR de escamas de botellas de PET postconsumo (azul) y BHET producto de despolimerización de PET (negro).

El análisis espectroscópico de las muestras, producto de la reacción de depolimerización, presentan cambios considerables confirmados mediante una amplia banda de absorción centrada alrededor de 3301 cm^{-1} característica de las vibraciones de estiramiento asociadas al grupo funcional OH del BHET. La banda centrada en 2934 cm^{-1} corresponde a las vibraciones de estiramiento C-H de los grupos funcionales CH_2 , la banda en 1656 cm^{-1} surge por las vibraciones de estiramientos de los grupos carboxílicos C=O; las pequeñas bandas centradas en 1456 , 1407 y 1334 cm^{-1} , son el resultado de las vibraciones de estiramiento de los grupos C-O, deformación de los grupos O-H y a los modos vibracionales de balanceo y torsión del etilenglicol, respectivamente. La Tabla 21 describe la interpretación de los valores obtenidos de acuerdo con el espectro de vibración y su respectiva banda, valores obtenidos por Silverstein y Webster (1998).

Tabla 21. Bandas con modo vibracional asignado de un espectro FTIR de una muestra de PET

Bandas de absorción (cm^{-1})	Bandas
3432	Grupos OH (hidroxilo)
3054	Estiramiento simétrico del CH
2969 and 2908	C-H, estiramiento simétrico
2350	Deformación simétrica axial del CO_2
1730	Estiramiento de C=O de grupo ácido carboxílico
1577 and 1504	Vibraciones esqueleto aromático con estiramiento C=C
1453, 1410 and 1342	Estiramiento de la deformación del grupo C-o del grupo O-H y modos vibratorios de flexión y movimiento del segmento de etilenglicol
1240 and 1124	Grupo tereftalato ($\text{OOC}_6\text{H}_4\text{-COO}$)
1096 and 1050	M Grupo metileno y vibraciones del enlace éster C-O
972, 872 and 848	Anillos aromáticos 1.2.4.5: Tetra reemplazado Vibraciones de dos H adyacentes aromáticos en compuestos sustituidos con p y bandas aromáticas
1960 and 795	con p y bandas aromáticas
712	Interacción de grupos polares de éster y anillos de benceno

Fuente. Silverstein y Webster (1998).

El análisis TGA/DSC se desarrolló con un analizador térmico Mettler Toledo, como se muestra en la figura 25.



Figura 25. Analizador térmico TGA/DSC Mettler Toledo.

Mediante esta prueba se midió el cambio de masa y el flujo de calor de las hojuelas de PET y del producto de la depolimerización a través de un periodo de tiempo determinado. El experimento se llevó a cabo bajo las siguientes condiciones:

Temperatura inicial=25°C

Temperatura final= 600°C

Incremento= 10°C/min

Gas= nitrógeno suministrado a 50 ml/min

Masa de la muestra= 5mg

Masa de los residuos=4.09mg

En las figuras 26 y 27 se muestran los gráficos obtenidos por análisis TGA y DSC respectivamente.

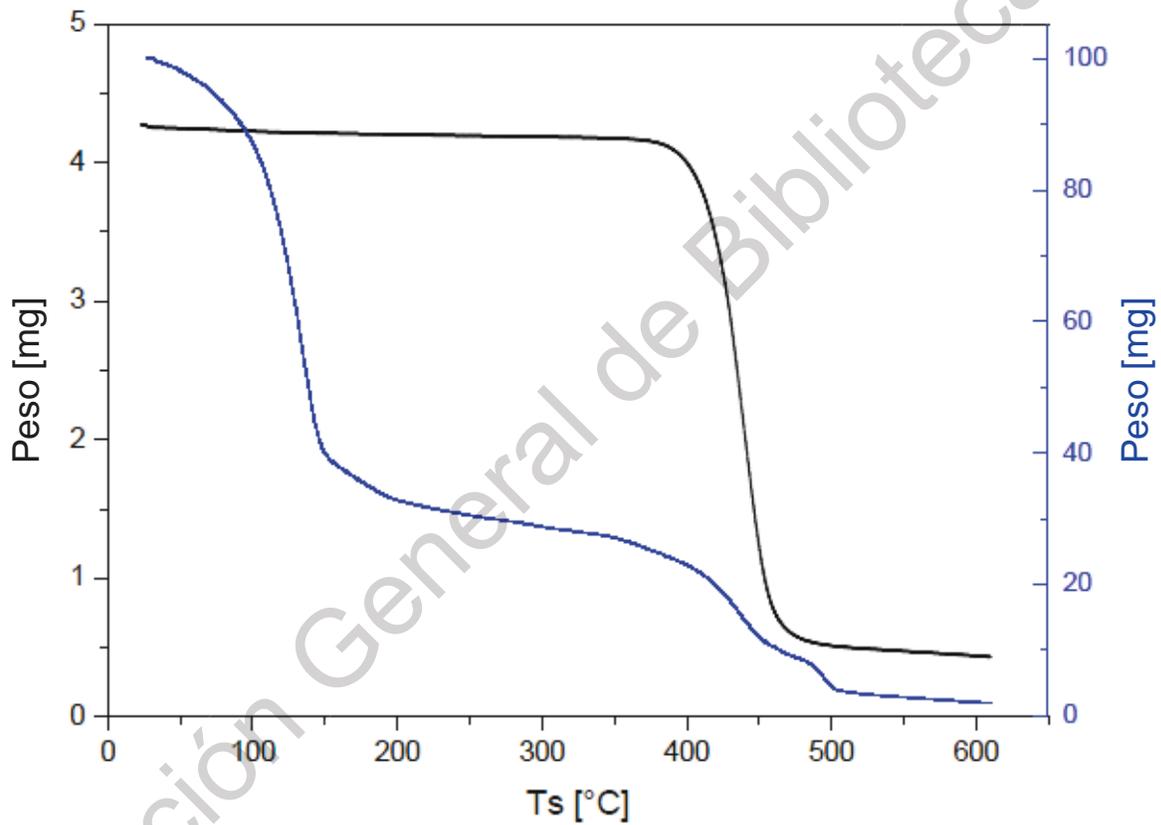


Figura 26. Curvas calorimétricas obtenidas del análisis termogravimétrico. La línea en negro corresponde a las hojuelas de PET. La línea en azul corresponde al producto de la depolimerización.

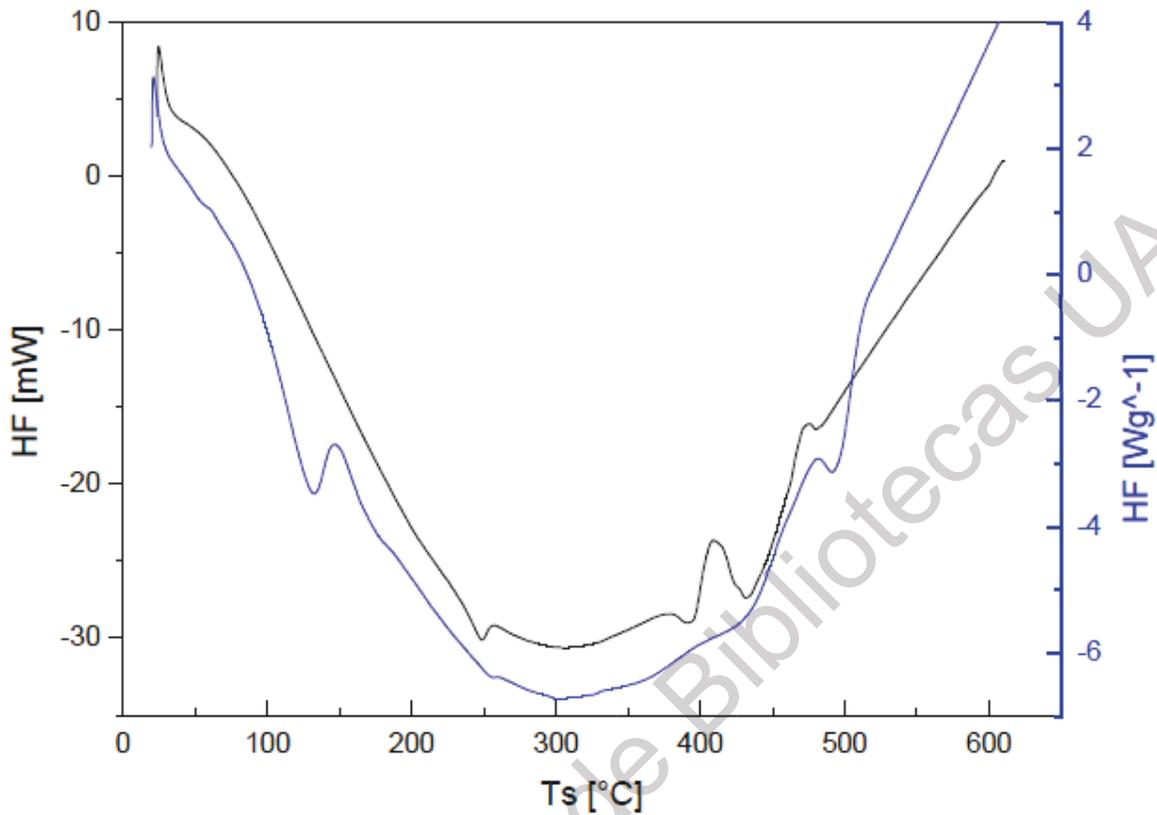


Figura 27. Curvas calorimétricas obtenidas del análisis de calorimetría con diferencial de barrido. La línea en negro corresponde a las hojuelas de PET. La línea en azul corresponde al producto de la depolimerización.

De las curvas calorimétricas obtenidas del análisis TGA se puede observar la diferencia encontrada en la estabilidad térmica para cada material. En el caso del PET, el rango de dicha condición se encuentra de 0 a 400 °C, mientras que el producto de la depolimerización muestra una estabilidad térmica en un rango de temperatura corto de 0 a 80°C y la pérdida de masa por material volátil se presenta a los 130°C, mientras que en el PET dicha pérdida se da en los 420°C, tal y como se reporta en la investigación de Wang *et al.* (2018). De este resultado se tiene que

el material producto de la depolimerización ya no se conforma por PET en su totalidad, quedando una similitud en las curvas por la última pérdida de masa registrada a los 480°C.

Por otro lado, del análisis DSC se pudo registrar la transición térmica experimentada por ambos materiales mediante la medición del flujo de calor para el análisis de las curvas calorimétricas. De estas se determinaron 3 fases para ambos materiales. En el caso del PET la primera fue una caída conocida como transición vítrea dada a los 240°C, que consiste en liberación de calor. Posterior a esta se tuvo una cristalización a los 420°C, que consiste en recuperación del calor previamente perdido y finalmente la fase de fusión, mostrada a los 480°C. Las mismas fases se registraron para el material producto de la depolimerización, aunque estas se dieron a diferentes temperaturas, lo cual corrobora que los materiales tienen una composición química diferente y de esto se determinó que el material producto de la depolimerización no contiene PET, lo cual indica que la glicólisis se realizó de manera exitosa.

4.3 Diseño de mezclas con diferentes proporciones

Para el diseño de mezclas fue empleado el método ACI-211.1, con un módulo de ruptura de 48 kg/cm². Dado que este método emplea un parámetro de diseño a la compresión simple, fue necesario el empleo de una correlación propuesta por el ACI para determinar el diseño a la flexión buscado, la cual consiste en lo que expresa la ecuación 3:

$$MR = 2.65\sqrt{f'c} \quad (3)$$

Dónde:

MR= módulo de ruptura del concreto hidráulico

F´c= resistencia a la falla producida por la compresión simple

Con base en esta correlación y el módulo de ruptura buscado, se planteó una resistencia a la compresión simple de 350 kg/cm² para el diseño de la mezcla. Siguiendo la metodología del diseño el primer parámetro requerido es el revenimiento. Para el caso particular se eligió un revenimiento de 8 cm ya que un revenimiento en el rango de 2 cm a 8 cm es el adecuado para pavimentos. Enseguida se requiere el tamaño máximo del agregado que para este caso es de 40 mm. Dotando a la metodología con estos valores fue posible encontrar que la cantidad de agua necesaria para desarrollar 1 m³ de concreto es de 175 l. Contando con la resistencia a la compresión simple buscada para el diseño y la cantidad de agua requerida se obtuvo la relación agua cemento A/C igual a 0.48. Esto es indicativo de que el concreto será poco trabajable por la baja cantidad de agua

requerida, pero dicho valor se justifica ya que es necesaria una alta cantidad de cemento para la obtención de una resistencia a la compresión simple de 350 kg/cm².

Finalmente se toman en cuenta las densidades y pesos volumétricos de todos los materiales para poder obtener las cantidades de cemento, agua, arena y grava en unidades de peso para obtener 1 m³ de concreto hidráulico. El resultado obtenido del diseño se muestra en la tabla 22.

Tabla 22. Proporciones obtenidas para el diseño de la mezcla con $f'c=350$ kg/cm²

Material	Cantidades por 1 m ³ de concreto hidráulico (kg)
Cemento	365
Agua	175
Arena	591
Grava	772

Fuente. Elaboración propia

Con esta proporción fue posible desarrollar todas las mezclas a emplear en la experimentación con una variante según el porcentaje de polímero añadido y la cantidad de cemento. Es decir, en el desarrollo de 1 m³ de concreto hidráulico, teniendo un porcentaje de adición del polímero del 6%, se hará esta reducción del cemento del 6% del peso total empleado en el diseño, lo cual equivale a 22 kg y se hará esta adición, equivalente a 22 l del polímero. La misma acción se realizó para cada porcentaje evaluado. Este procedimiento fue realizado con la intención de reducir la cantidad de cemento y hacer la sustitución por el polímero, para comprobar que teniendo menores cantidades de cemento es posible tener

incrementos en las propiedades mecánicas y por ende un desempeño acorde a lo solicitado para un pavimento.

La dosificación del mortero se tomó de la norma NMX-C-061-ONNCE-2001, la cual dicta los diferentes tipos de dosificación, según el tipo de cemento a emplear. En el caso particular de esta investigación, se empleó Cemento Portland Ordinario. En la tabla 23 se muestra la proporción utilizada para todos los especímenes.

Tabla 23. Proporciones obtenidas para el diseño de la mezcla de mortero hidráulico

Material	Cantidades por 1 m ³ de mortero hidráulico (kg)
Cemento	2000
Agua	1768
Arena	5500

Fuente. NMX-C-061-ONNCE-2001

De esta dosificación se desarrollaron los especímenes para la experimentación del mortero polimérico, haciendo de igual manera, las sustituciones de cemento por BHET de acuerdo con los porcentajes previamente descritos.

4.4 Propiedades mecánicas del mortero polimérico

Los cubos de mortero polimérico se probaron en compresión, como se muestra en la figura 28. Los resultados con diferente contenido de resina se dan en la tabla 24. La variación de los resultados se muestra en la figura 29.



Figura 28. Ensayo a compresión de mortero con resina de BHET

Tabla 24. Valores de resistencia a la compresión obtenidos como respuesta al ensayo de compresión de mortero a diferentes contenidos de BHET a la edad de 28 días. (wo: sin sustitución de cemento; w: con sustitución de cemento).

Ensayo	Contenido de BHET (%)	Resistencia a la compresión, F_c (MPa)	Peso volumétrico (kg/m^3)
1 wo	3	14.94	1956.75
2 wo	6	10.83	1870.04
3 wo	9	11.91	1915.05
4 wo	12	12.17	1898.11
5 wo	20	9.22	1890.25
6 w	3	9.78	1878.6
7 w	6	10.09	1960.5
8 w	9	8.56	1883.82
9 w	12	8.6	1897.02
10 w	20	5.2	1886.84
11	0	11.46	1855.99

Fuente. Elaboración propia

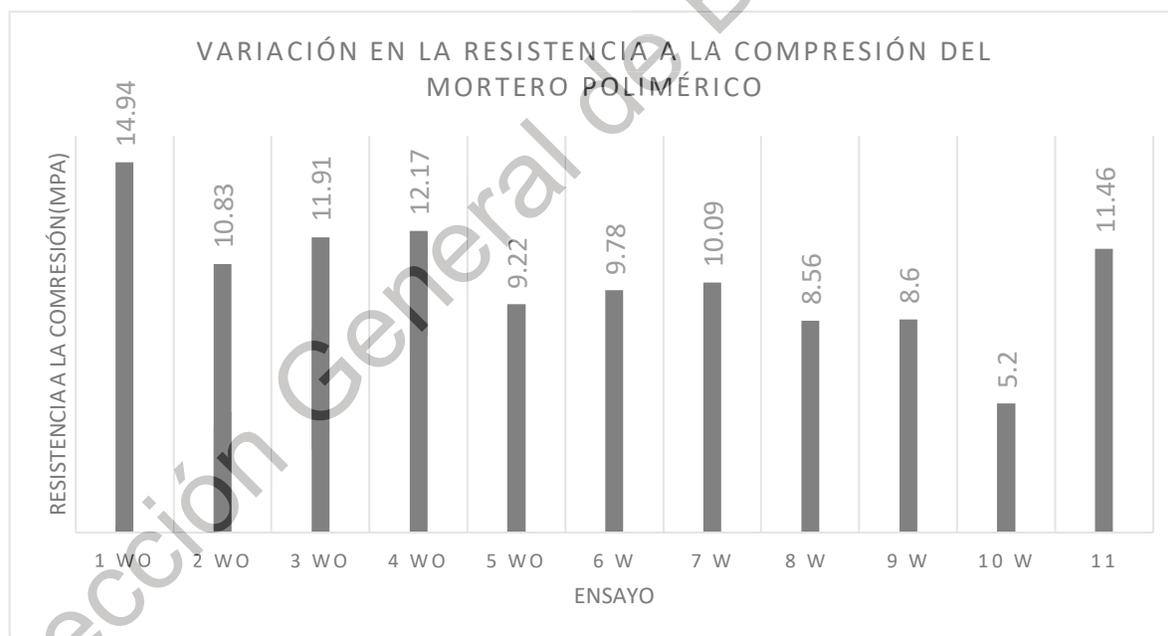


Figura 29. Variación de la resistencia a la compresión del mortero polimérico con diferentes porcentajes de BHET en la mezcla.

Como se muestra en la tabla 6, los resultados obtenidos para cada porcentaje son muy variados con respecto al ensayo 11, en la que la resina no se usó y es el parámetro base. En general, la combinación que mostró el mejor resultado fue el ensayo 1 wo, que contiene un 3% de BHET con respecto a la cantidad de cemento utilizado en la mezcla y mostró un incremento en la resistencia a la compresión del 30%. Este resultado se interpretaría utilizando BHET como un aditivo y no como un sustituto del cemento. En el caso de la sustitución, el porcentaje que presentó un mejor rendimiento fue el del 6% de resina, con una resistencia a la compresión simple de 10.09 MPa. Esto puede interpretarse como una disminución del 12% con respecto a la resistencia base. Una vez que se determinó el porcentaje que otorgó la mayor resistencia, se analizó su de acuerdo con los días de curado en 7, 14 y finalmente 28 días. Los resultados se muestran en la figura 30.

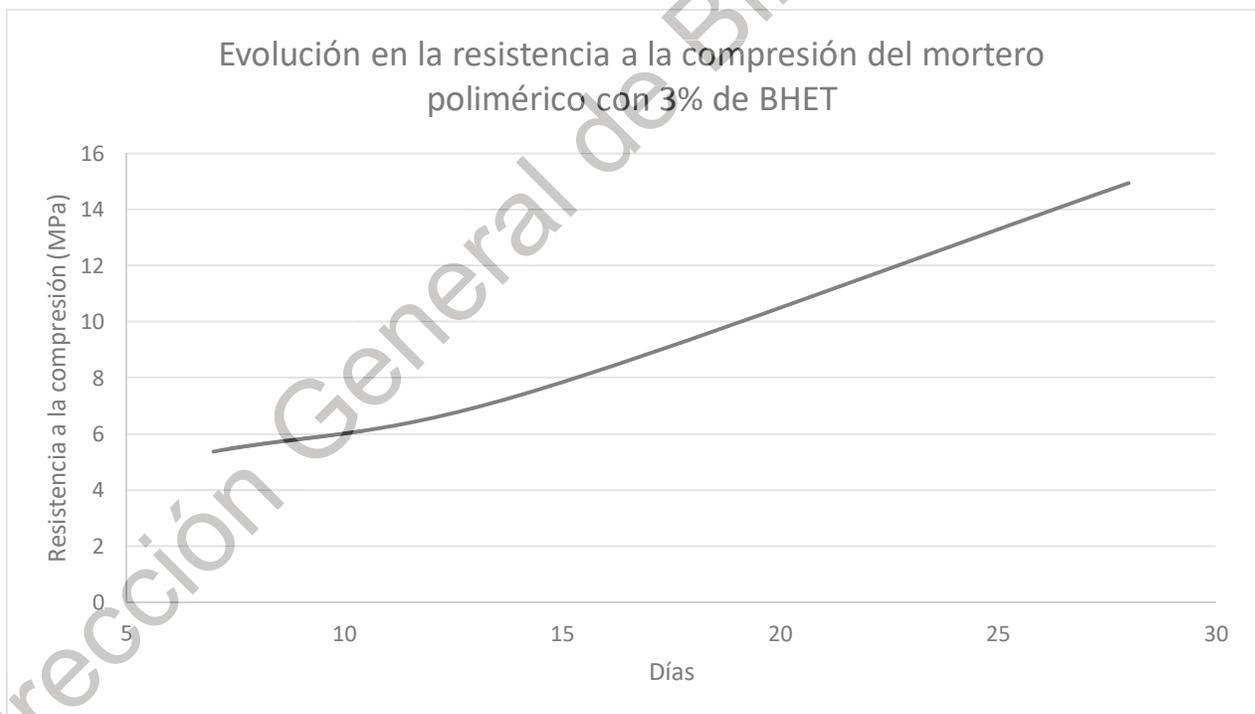


Figura 30. Evolución en la resistencia a la compresión del mortero polimérico con 3% de BHET sin sustitución de cemento.

El material tiene un comportamiento similar al del concreto hidráulico, aunque presenta una tendencia a aumentar linealmente después de 14 días, una característica que no ocurre en este material.

4.5 Propiedades mecánicas del concreto polimérico

Una vez que se analizó la resistencia a la compresión del mortero y se determinó el porcentaje que proporcionó una mejora en la resistencia, el experimento se repitió en vigas de concreto con una sección de 0.0225 m^2 con una longitud de 0.50 m, aplicando carga en los tercios del claro para obtener el módulo de ruptura, como se especifica en la norma ASTM C78 (Ver figura 31). El resultado obtenido se muestra en la figura 32.



Figura 31. Ensayo a flexión de concreto polimérico con 3% de BHET sin sustitución de cemento.

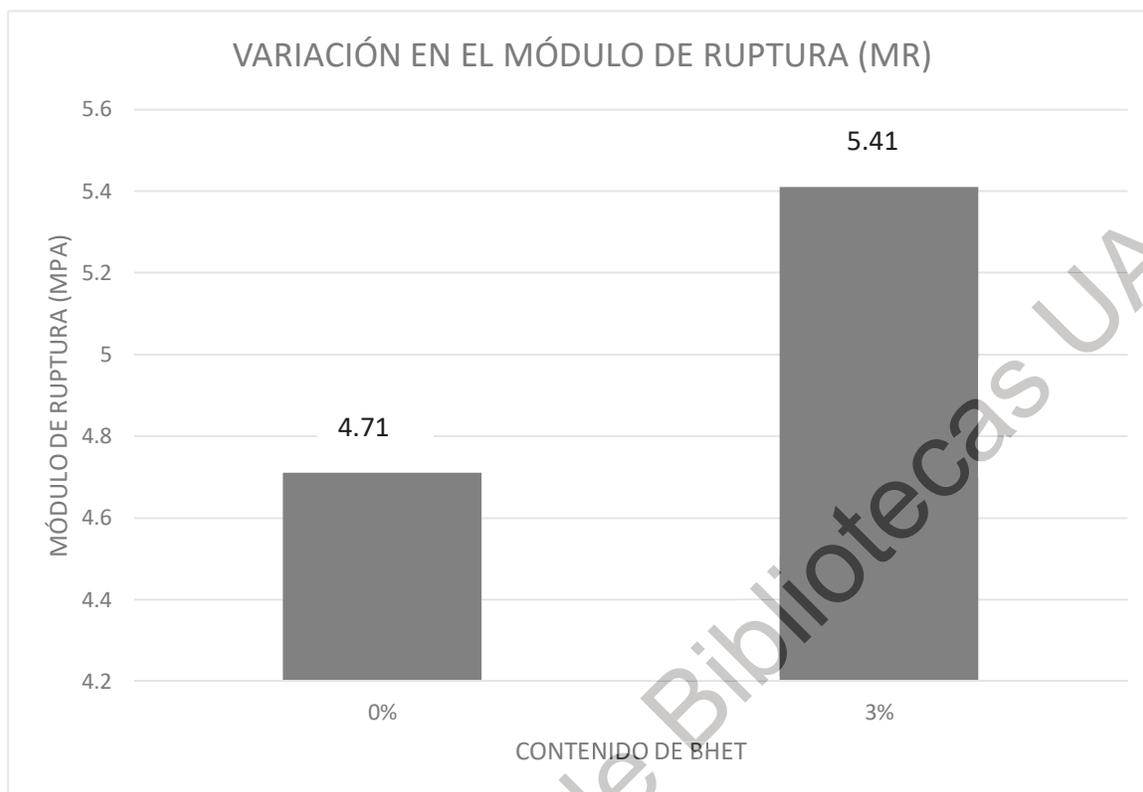


Figura 32. Variación del módulo de ruptura del concreto hidráulico en comparación con el concreto polimérico con 3% de BHET empleado como aditivo.

La mezcla tuvo un aumento del 15% en la resistencia a la flexión, dando al material la capacidad de funcionar como pavimento rígido de altas especificaciones.

La prueba de revenimiento se aplicó siguiendo lo descrito en la norma ASTM C109, como se muestra en la figura 33.



Figura 33. Prueba de revenimiento realizada en concreto polimérico con 3% de BHET como aditivo.

De esta prueba se obtuvo un revenimiento de 7 cm tanto para el concreto polimérico como para el concreto hidráulico, valor adecuado para ser empleado como pavimento. No existió variación debido a que la adición del 3% de resina no representó cambios significativos en la trabajabilidad del material.

5. Conclusiones

Analizando la información recabada de todas las investigaciones citadas, se puede determinar que no es casualidad que el concreto hidráulico con polímeros de diversos tipos adquiere propiedades mecánicas superiores a las de un concreto hidráulico convencional, las cuales pueden ser aprovechadas en el ámbito de las vías terrestres, para la implementación de un material para pavimentación que pueda ser competitivo con los materiales de la actualidad. El reciclaje químico de PET tiene la gran ventaja de poder usar todo tipo de botellas, sin tener que hacer una separación debido a los colores, ya que esta característica no influye en el resultado. Tener la disposición de obtener un aditivo para el concreto hidráulico utilizando residuos sólidos urbanos podría generar impactos positivos en el medio ambiente a través del ahorro de energía, ya que actualmente estos existen en exceso en las zonas urbanas de todo el mundo. De la presente investigación, se destacan los siguientes puntos:

- I. Mediante el análisis FTIR fue posible verificar que la resina obtenida de la glicolisis es BHET y por medio del análisis TGA/DSC se identificó que los residuos de la reacción no se conforman de PET, lo cual asegura que se está dando la depolimerización.
- II. Las pruebas realizadas en las 33 muestras de mortero mostraron que la cantidad de resina en la que existe la mejor interacción es el 3% del peso del cemento, brindando un incremento en la resistencia a la compresión simple del 30%
- III. Al utilizarse el 3% de resina en las mezclas de concreto polimérico se obtuvo un incremento en la resistencia a la flexión 15%. De este punto se puede partir para realizar una dosificación que tenga por diseño un MR mayor o igual a 4 MPa, utilizar una menor cantidad de cemento y alcanzar un MR de 4.71, recomendando por AASHTO para autopistas de altas especificaciones.

De los 3 puntos anteriores se determina que la resistencia a la compresión y flexión del concreto polimérico utilizando BHET como aditivo es mayor que la de un concreto hidráulico convencional. De acuerdo con la hipótesis de esta investigación, se buscó obtener una mejora del 50% para la compresión y la flexión, valor que no fue posible obtener, sin embargo, se obtuvo un resultado positivo mediante la adición de la resina y se cumple con el objetivo de la investigación, ya que se logró obtener propiedades mecánicas superiores a las del concreto hidráulico convencional, utilizando la misma dosificación. Las propiedades mecánicas del polímero se reflejan en el rendimiento del material. La cantidad de resina utilizada en la mezcla es un parámetro clave para lograr un rendimiento óptimo, porque si se agrega en cantidades excesivas, la resistencia tendrá una tendencia a la baja.

Varias investigaciones en las que se agregó PET en fibra demuestran resultados similares, en los cuales hay un aumento en la resistencia al agregar la fibra en una cantidad específica. En la investigación desarrollada por Ochi *et al.* (2007) se tuvieron incrementos en la resistencia a la flexión de 0.10 a 0.70 MPa adicionando fibras de PET en diferentes longitudes y cantidades. Para el concreto reforzado, la investigación desarrollada por Pelisser *et al.* (2012) se obtuvo una mejora del 19.2% a 28 días con determinada cantidad de fibras de PET adicionadas a la mezcla. De Oliveira y Castro (2011) obtuvieron un incremento en la resistencia a la flexión en el mortero a los 60 días del doble de lo obtenido a 7 días. Con esto se pueden confirmar compatibilidad entre el PET y el concreto hidráulico.

De lo descrito anteriormente se tiene que mediante los incrementos en la resistencia a la flexión se podrán tener pavimentos rígidos competentes para las altas demandas presentadas en la actualidad por el incesante incremento del tráfico y las necesidades de traslados. Así, las acciones de conservación de pavimentos

podrán verse reducidas, ya que al contar con un material que otorgue un módulo de ruptura mayor al obtenido por un concreto hidráulico convencional, los periodos de diseño estimados podrán ser superiores, lo cual a su vez se ve reflejado de forma positiva en el ámbito económico.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

6. REFERENCIAS

Adnan, Shah, J. y Jan, M.R. (2016) Recovery of Valuable Hydrocarbons from Waste Polystyrene Using Zinc Supported Catalysts. *Journals of polymers and the environment*, 25:759. Doi:10.1007/s10924-016-0858-4.

Ahmed, I., Rahman, M., Seraj, S. y Hoque, A. (1988) Performance of plain concrete runway pavement. *Journal of performance of constructed facilities*, 12, 145–152.

Ahn, S., Jeon, E., Koh, H., Kim, H. y Park, J. (2016) Identification of stiffness distribution of fatigue loaded polymer concrete through vibration measurements. *Composite Structures*, 136, 11-15.

Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A., y Gutiérrez, A. (2009) Influence of content and particle size of waste PET bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*, 29(10), 2707–271.

Alkaissi, Z. (2018). Effect of high temperature and traffic loading on rutting performance of flexible pavement. *Journal Of King Saud University - Engineering Sciences*. doi:10.1016/j.jksues.2018.04.005

American Association of State Highway and Transportation Officials (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington D.C.

American Concrete Institute, ACI Committee 211, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, (2002).

American Concrete Institute, ACI (2017). Committee 325, Guide for Design and Proportioning of Concrete Mixtures for Pavements, Report 325.14R-17.

American Concrete Institute, ACI (2010). Committee 522, Report on Pervious Concrete – Pervious Concrete Mixture Proportioning, Report 522R-10.

Akçaözog˘lu, S., Atis, C.D. y Akçaözog˘lu, K. (2010) An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Manage.* 30, 285–290.

Akçaözog˘lu, S. y Ulu, C. (2014) Recycling of waste PET granules as aggregate in alkali activated blast furnace slag/metakaolin blends. *Construction and Building Materials.* 58, 31–37.

Asokan, P., Osmani, M., y Price, A. (2010) Improvement of the mechanical properties of glass fibre reinforced plastic waste powder filled concrete. *Construction and Building Materials*, 24(4), 448–460.

ASTM C29 / C29M-17a, Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017

ASTM C39 / C39M-17b, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2017).

ASTM C127-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015

ASTM C128-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015

ASTM C136 / C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014

ASTM C469 / C469M-14, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2014).

ASTM C496 / C496M-17, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2017).

ASTM C78 / C78M-16, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, (2016).

ASTM C143 / C143M-15a, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

Atta, M.A., Abdel-Raouf, M.E., Elsaheed, S. y Abdel-Azim, A. (2005) Curable resins based on recycled poly (ethylene terephthalate) for coating applications. *Progress in organic coatings*, 55, 50-59.

Bartolome, L., Imran, M., Cho, B. G., Al-Masry, W.A. y Kim, D.H. (2012) Recent Developments in the Chemical Recycling of PET, *Material Recycling – Trends and Perspectives*, 65-84.

Babu, K. G. y Babu, D. S. (2003) Behavior of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, 33(5), 755–762.

Babu, D.S., Babu, K.G. y Wee, T. (2005) Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. *Cement and Concrete research*. 35, 1218–1223.

- Babu, D. S., Ganesh Babu, K., y Tiong-Huan, W. (2006) Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*, 28(6), 520–527.
- Bonicelli A., Giustozzi, F. y Crispino, M. (2015b) Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. *Construction and building materials*, 91, 102–110.
- Bonicelli, A., Giustozzi, F., Crispino, M. y Borsa, M. (2015a) Evaluating the effect of reinforcing fibres on pervious concrete volumetric and mechanical properties according to different compaction energies. *European Journal of environmental and civil engineering*, 19,184-198. Doi: dx.doi.org/10.1080/19648189.2014.939308.
- Bagherzadeh, R., Sadeghi, A.-H. y Latifi, M. (2011) Utilizing polypropylene fibers to improve physical and mechanical properties of concrete. *Textil Research Journal*.82, 88-96.
- CEMEX Concretos S.A. de C.V. (2001) *Manual de diseño y construcción de pavimentos*. México D.F.
- Cata, A., Miclau, M., Ienascu, I., Ursu, D., Tanasie, C. y Stefanut, N. (2015) Chemical recycling of polyethylene terephthalate (PET) waste using sub-and supercritical water. *Revue Roumaine de Chimie*, 60, 579-585
- Chaudhary, M., Srivastava, V. y Agarwal, V. (2014) Effect of waste low density polyethylene on mechanical properties of concrete. *J. Acad. Ind. Res.*3, 123.
- Chaukura, N., Gwenzi, W., Bunhu, T. y Ruziwa, I.P. (2015) Potential uses and value-added products derived from waste polystyrene in developing countries: A review, *Resources. Conservation and recycling*, 107, 157-165.

Chen, Z., Hay, J. y Jenkins, M. (2013). The thermal analysis of poly(ethylene terephthalate) by FTIR spectroscopy. *Thermochimica Acta*, 552, 123-130. doi:10.1016/j.tca.2012.11.002

Chen, B., y Liu, J. (2004) Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1259–1263.

Choi, Y.-W., Moon, D.-J., Chung, J.-S., y Cho, S.-K. (2005) Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 776–781.

Choi, Y. W., Moon, D. J., Kim, Y. J., y Lachemi, M. (2009) Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2829–2835.

Choi, Y. y Yuan, R. (2005) Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of GFRC and PFRC. *Cement and concrete research*, 35, 1587-1591.

Drah, A., Rusmirovic, J., Milosevic, M., Kalifa, M., Stojiljkovic, I., Rancic, M. y Marinkovic., A. (2016) Techo-economic analysis of unsaturated polyester production from waste PET. *Zastita Materijala*, 57, 605-612.

Elgegren, M. y Nakamatsu, K. (2009) Poliésteres saturados a partir de desechos de PET. *Revista de la sociedad química del Perú*, 1, 26-32.

Farahat, M. (2002) Mechanical characteristics of modified unsaturated polyester resins derived from poly (ethylene terephthalate) waste. *Polymer International*, 51, 183-189.

Ferreira, L., de Brito, J., y Saikia, N. (2012) Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate. *Construction and Building Materials*, 36, 196–204.

Frabizzio, M. y Buch, N. (1999) Performance of transverse cracking in jointed concrete pavements. *Journal of performance of constructed facilities*, 13, 172–180.

Fraternali, F., Spadea, S. y Berardi, V. P. (2014) Effects of recycled PET fibres on the mechanical properties and seawater curing of Portland cement-based concretes. *Construction and Building Materials*, 61, 293–302.

Frigione, M. (2010) Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 30(6), 1101–1106.

Galvão, J. C. A., Portella, K. F., Joukoski, A., Mendes, R., y Ferreira, E. S. (2011) Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. *Construction and Building Materials*, 25(2), 1049–1055.

Garnica, P, Gómez, J.A. y Sesma, J.A. (2002) Mecánica de materiales para pavimentos. Instituto Mexicano del Transporte. *Publicación Técnica No. 197*. Querétaro, México.

Ge, Z., Sun, R., Zhang, K., Gao, Z. y Li, P. (2013) Physical and mechanical properties of mortar using waste Polyethylene Terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*, 44, 81–86.

George, N. y Kurian, T. (2014) Recent developments in the chemical recycling of postconsumer Poly (ethylene terephthalate) waste. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 53, 14185-14198.

- Giussani, F. y Mola, F., (2012) Durable concrete pavements: the reconstruction of runway head 36R of Milano Linate International Airport. *Construction and building materials*, 34, 352-361.
- Giustozzi, F. (2016). Polymer-modified pervious concrete for durable and sustainable transportation infrastructures. *Construction and Building Materials*, 111, 502-512. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.136
- Gu, L. y Ozbakkaloglu, T. (2016) Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*, 51, 19–42.
- Herrera, J. y Estrada, A. (2012) Depolimerización de botellas de poli tereftalato de etileno (PET) post-consumo mediante glicólisis. I. efecto de del catalizador y del tipo de glicol, *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 13 (3), 117-129.
- Hsie, M., Tu, C. y Song, P. S. (2008) Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 494(1-2), 153–157.
- Huang Yang (2004), *Pavement analysis and design*. New Jersey, United States of America: Prentice-Hall, Pearson.
- Huang, B., Wu, H., Shu, X. y Burdette, E. (2010) Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. *Construction and building materials*, 24, 818–823.
- Imran, M., Kim, B., Han, M., Cho, B. y Kim, D. (2010) Sub- and supercritical glycolysis of polyethylene terephthalate (PET) into monomer bis (2-hydroxyethyl) terephthalate (BHET). *Polymer Degradation and Stability*, 95, 1686-1693.
- Ismail, Z.Z. y Al-Hashmi, E.A. (2008) Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Manage.* 28, 2041–2047.

- Jo, B. W., Park, S. K. y Park, J. C. (2008) Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates. *Construction and building Materials*, 22, 2281-2291.
- Juki, M. I., Awang, M., Annas, M. M. K., Boon, K. H., Othman, N., Bitni A.K. y Khalid, F. S. (2013). Relationship between Compressive, Splitting Tensile and Flexural Strength of Concrete Containing Granulated Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Bottles as Fine Aggregate. *Advanced Materials Research*, 795, 356–359.
- Kan, A., y Demirboğa, R. (2009) A novel material for lightweight concrete production. *Cement and Concrete Composites*, 31(7), 489–495.
- Kaya, A. y Kar, F. (2016) Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. *Construction and building materials*, 105, 572-578.
- Kayali, O., Haque, M. y Zhu, B. (2003) Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25(2), 207–213.
- Kayali, O., Haque, M., Zhu, B. (1999) Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash. *Cement and Concrete Research*. 29, 1835–184.
- Kou, S. C., Lee, G., Poon, C. S., y Lai, W. L. (2009) Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Management*, 29(2), 621–628.
- Krishnamoorthy, R., David, T., Mastor, N., y Nadarasa, K. (2016) Repair of Deteriorating Pavement Using Recycle Concrete Materials. *Procedia Engineering*, 142, 371-382.

- López-Buendía, A.M., Romero-Sánchez, M.D., Climent, V. y Guillem, C. (2013) Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*. 54, 29–35.
- Lima, P. R. L., Leite, M. B., y Santiago, E. Q. R. (2010) Recycled lightweight concrete made from footwear industry waste and CDW. *Waste Management*, 30(6), 1107–1113.
- Lima, P., Santos, R., Ferreira, S. y Toledo, R. (2014) Characterization and treatment of sisal fiber residues for cement-based composite application. *Eng. Agric. Jaboticabal*, 34, 812-825.
- Mahdi, F., Khan, Khan, A. A. y Abbas, H. (2007) Physiochemical properties of polymer mortar composites using resins derived from post-consumer PET bottles. *Cement & Concrete Composites*, 29, 241-248.
- Mani, P., Gupta, A.K. y Krishnamoorthy, S (1987). Comparative-study of epoxy and polyester resin-based polymer concretes. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 7, 157–163.
- Marzouk, O.Y., Dheilly, R. y Queneudec, M. (2007) Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Manage.* 27, 310–318.
- Mazaheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S. y Hosseinpour, I. (2011) The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 25, 351–358.
- Mehta, P.K. y Monteiro, J.M. (2008) Concrete: Structure, Properties and Materials, Second ed, Editora PINI, Sao Paulo.

- McGinnis, M., Davis, M., De la Rosa, A., Weldon, B. y Kurama, Y. (2017) Quantified sustainability of recycled concrete aggregates. *Magazine of concrete research*. Doi: <https://doi.org/10.1680/jmacr.16.00338>.
- Montejo, A. (1997). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Bogotá, Colombia: Agora.
- Muthukumar, M. y Mohan, D. (2004). Studies on polymer concretes based on optimized aggregate mix proportion. *European Polymer Journal*, 40, 2167–2177. Doi: 10.1016/j.eurpolymj.2004.05.004.
- Nibudey, R., Nagarnaik, P., Parbat, D. y Pande, A. (2013) Strength and fracture properties of post consumed waste plastic fiber reinforced concrete. *Int. J. Civ. Struct. Environ. Infrastruct. Eng. Res. Dev.*9–16.
- Nili, M., y Afroughsabet, V. (2010) The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 24(6), 927–933.
- Nobili, A., Lanzoni, L. y Tarantino, A.M. (2013) Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based m fiber reinforced concrete road pavement. *Construction and building materials*, 47, 888-895.
- Ochi, T., Okubo, S., y Fukui, K. (2007) Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*, 29(6), 448–455.
- de Oliveira, L.A.P. y Castro-Gomes, J.P. (2011) Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. *Construction and Building Materials*. 25, 1712–1717.

- Olivera, F. (1986). *Estructuración de vías terrestres*. Ciudad de México, México: Continental.
- Pelisser, F., Klegues, O., Gleize, P. y Ramos, H. (2012) Mechanical Properties of Recycled PET Fibers in Concrete. *Materials Research*, 15, 679-686.
- Pereira, E. L., Oliveira, A. L. y Fineza, A.G. (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*, 149, 837-848.
- Pindado, M., Aguado, A. y Josa, A. (1999) Fatigue behavior of polymer-modified porous concrete. *Cement and concrete research*, 29, 1077–1083.
- Ramadevi, K. y Manju, R. (2012) Experimental investigation on the properties of concrete with plastic PET (bottle) fibres as fine aggregates. *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.* 2, 42–46.
- Rai, B., Rushad, S.T., Kr, B. y Duggal, S. (2012) Study of Waste Plastic Mix Concrete with Plasticizer. *International Scholarly Research Notices*.
- Rico, R.A. y Del Castillo, H.M. (1977) *La Ingeniería De Suelos En Las Vías Terrestres, Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen 2*. Limusa, Noriega Editores. México, D.F.
- Roh, I., Jung, K.C., Chang, S. y Cho, Y. (2015) Characterization of compliant polymer concretes for rapid repair of runways. *Construction and building materials*, 78, 77-84.
- SCT (2006). Normativa para la infraestructura del transporte N-CTR-CAR-1-04-009/06. Construcción de pavimentos de concreto hidráulico. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Diario oficial de la Federación, 29 de noviembre de 2006.

- Sheel, A. y Pant, D. (2019) *Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles via Glycolysis*. USA, NY: William Andrew. ISBN: 978-0-12-811361-5
- Saikia, N., y de Brito, J. (2013) Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete. *Materials Research*, 16(2), 341–350.
- Saikia, N. y de Brito, J. (2014) Mechanical properties and abrasion behavior of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, 52, 236–244.
- Silverstein, R. M., Webster, F. y Kiemle, D. (1998). *Spectrometric Identification of Organic Compounds*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Sinha, V., Patel, M., y Patel, J. (2008). Pet Waste Management by Chemical Recycling: A Review. *Journal Of Polymers And The Environment*, 18(1), 8-25. doi:10.1007/s10924-008-0106-7
- Song, P. S., Hwang, S., y Sheu, B. C. (2005) Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1546–1550.
- Suh, D.J., Park, O.O. y Yoon, K.H. (2000) The properties of unsaturated polyesters based on the glycolyzed poly (ethylene terephthalate) with various glycol compositions. *Polymer*, 41, 461-466.
- Sujatha, T., Kannapiran, K. y Nagan, S. (2012) Strength assessment of heat cured geopolymer concrete slender column. *Asian journal of civil engineering*, 13, 635-646.
- Suji, D., Natesan, S. C., y Murugesan, R. (2007) Experimental study on behaviors of polypropylene fibrous concrete beams. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 8(7), 1101–1109.

- Sri Ravindrarajah, R., y Tuck, A. J. (1994) Properties of hardened concrete containing treated expanded polystyrene beads. *Cement and Concrete Composites*, 16(4), 273–277.
- Sun, L., Huang, W.M., Wang, T.X., Chen, H.M., Renata, C., He, L.W., Lv, P. and Wang, C.C. (2017) Elastic polymeric shape memory materials for comfort fitting: A brief review of recent progress. *Materials design*, 136, 238-248. Doi: 10.1016/j.matdes.2017.10.005.
- Tang, W. C., Lo, Y., & Nadeem, A. (2008) Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 30(5), 403–409.
- Toutanji, H., McNeil, S. y Bayasi, Z. (1998) Chloride permeability and impact resistance of polypropylene-fiber-reinforced silica fume concrete. *Cement and Concrete Research*. 28, 961–968.
- Valencia, D., Rodríguez, F. y León-Neira (2016) Estudio del comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto para pavimentos reforzada con fibras metálicas. *Ingeniería de construcción*, 32, 45-58.
- Vipulanandan, C. y Paul, E. (1992) Characterization of polyester polymer and polymer concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 5,62-82.
- Wang, C., Wu, L., Dai, Y., Zhu, Y., Wang, B., Zhong, Y., Zhang, L., Sui, X., Xu, H. y Mao, Z.(2018) Application of self-templated PHMA sub-microtubes in enhancing flame-retardance and anti-dripping of PET
- Wang, R., y Meyer, C. (2012) Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. *Cement and Concrete Composites*, 34(9), 975–981.

- Wang, Y., Zureick, A.-H., Cho, B.-S. y Scott, D. (1994) Properties of fibre reinforced concrete using recycled fibres from carpet industrial waste. *Journal of Materials Science*. 29,4191–4199.
- Wong, A., Childs, P., Berndt, R., Macken, T., Peng, G. y Gowripalan, N. (2007) Simultaneous measurement of shrinkage and temperature of reactive powder concrete at early-age using fibre Bragg grating sensors. *Cement & Concrete Composites*, 29, 490–497.
- Xi, G., Lu, M. y Sun, C. (2005) Study on depolymerization of waste polyethylene terephthalate into monomer of bis (2-hydroxyethyl terephthalate). *Polymer Degradation and Stability*, 87, 117-120.
- Yeon, K., Choi, Y., Kim, K. y Yeon, J. (2017) Flexural fatigue life analysis of unsaturated polyester-methyl methacrylate polymer concrete, *Construction and building materials*, 140, 336-343.
- Yorder, E. J. y Witzack, M. W. (1975) *Principles of pavement design*. United States of America: John Wiley & Sons.
- Ziari, H., Hayati, P. y Sobhani, J. (2016) Air-Entrained Air Field Self-Consolidating Concrete Pavements: Strength and Durability, *International journal of civil engineering*, 15, 21-33.

7. APÉNDICE

Anexo A – Geometría de especímenes cúbicos de mortero con sustitución de cemento/BHET (A=lados, H=altura)

Espécimen	Peso (gr)	A a (mm)	A b (mm)	H (mm)	Área (cm ²)
11 (a)	242.8	50.08	50.52	50.43	25.47
11 (b)	236.6	47.84	50.18	48.26	24.22
11 (c)	238.6	50.23	49.74	49.62	24.68
6w (a)	246.8	51.18	50.12	51.43	25.78
6w (b)	246.9	51.08	50.3	51.43	25.87
6w (c)	246.9	50.82	50.62	51.3	25.97
7w (a)	258.3	51.43	50.91	51.58	26.26
7w (b)	254.5	51.23	51.03	50.87	25.96
7w (c)	256.1	51.42	50.58	51.32	25.96
8w (a)	245.8	49.99	50.27	51.44	25.86
8w (b)	245.6	50.58	51.04	50.24	25.64
8w (c)	245.3	50.85	50.625	50.17	25.40
9w (a)	245.2	50.77	50.81	50.23	25.52
9w (b)	243.9	50.24	49.89	50.98	25.43
9w (c)	244.4	50.64	51.29	50.33	25.82
10w (a)	246.9	50.67	50.54	50.99	25.77
10w (b)	246.8	50.92	50.69	50.96	25.83
10w (c)	245.3	50.66	51.06	50.76	25.92

Anexo B – Geometría de especímenes cúbicos de mortero sin sustitución de cemento/BHET (A=lados, H=altura)

Espécimen	Peso (gr)	A a (mm)	A b (mm)	H (mm)	Área (cm ²)
1 wo (a)	245.5	49.8	49.8	50.2	25.00
1 wo (b)	245	50.23	49.8	49.9	24.85
1 wo (c)	243.5	50.5	49.47	50.07	24.77
2 wo (a)	233.6	50.42	50.03	49.9	24.97
2 wo (b)	230.4	49.93	48.87	48.67	23.78
2 wo (c)	231.5	50.38	49.2	50.33	24.76
3 wo (a)	243.8	50.1	51.23	50.43	25.84
3 wo (b)	244.1	50.3	50.58	49.87	25.22
3 wo (c)	240.5	50.35	50.98	49.73	25.36
4 wo (a)	239.5	50.58	50.6	50.47	25.54
4 wo (b)	244.9	50.53	50.95	50.27	25.61
4 wo (c)	240.3	50.15	50.1	49.97	25.03
5 wo (a)	240.7	50.43	51.22	50.53	25.88
5 wo (b)	239.8	50.22	51.13	50.4	25.77
5 wo (c)	239.9	50.4	49.92	50.97	25.44

Anexo C – Peso volumétrico y resistencia a la compresión especímenes cúbicos de mortero sin sustitución de cemento/BHET.

Espécimen	Peso vol. (kg/m ³)	Carga (ton)	Resistencia (Mpa)	Resistencia promedio (Mpa)	Peso vol. Promedio (kg/m ³)
11 (a)	1903.35	2.77	10.66		
11 (b)	2042.17	3	12.15	11.46	1956.75
11 (c)	1924.75	2.91	11.56		
6w (a)	1870.76	2.48	9.44		
6w (b)	1868.23	2.68	10.16	9.78	1870.04
6w (c)	1871.13	2.58	9.74		
7w (a)	1912.60	2.48	9.26		
7w (b)	1913.71	2.75	10.39	10.09	1915.05
7w (c)	1918.84	2.81	10.62		
8w (a)	1901.53	2.14	8.12		
8w (b)	1893.54	2.26	8.64	8.56	1898.11
8w (c)	1899.25	2.31	8.92		
9w (a)	1892.22	2.38	9.14		
9w (b)	1908.87	2.35	9.06	8.6	1890.25
9w (c)	1869.66	2	7.6		
10w (a)	1891.13	1.46	5.56		
10w (b)	1876.43	1.23	4.67	5.2	1878.6
10w (c)	1868.23	1.42	5.37		

Anexo D – Peso volumétrico y resistencia a la compresión especímenes cúbicos de mortero con sustitución de cemento/BHET.

Espécimen	Peso vol. (kg/m ³)	Carga (ton)	Resistencia (Mpa)	Resistencia promedio (Mpa)	Peso vol. Promedio (kg/m ³)
1 wo (a)	1971.92	3.78	14.83		
1 wo (b)	1962.66	3.88	15.31		
1 wo (c)	1946.91	3.71	14.69	14.94	1960.5
2 wo (a)	1855.83	2.45	9.62		
2 wo (b)	1940.20	2.84	11.71		
2 wo (c)	1855.42	2.82	11.17	10.83	1883.82
3 wo (a)	1883.33	3.02	11.46		
3 wo (b)	1923.90	3.15	12.25		
3 wo (c)	1883.82	3.11	12.03	11.91	1897.02
4 wo (a)	1854.14	3.48	13.36		
4 wo (b)	1892.29	3.01	11.53		
4 wo (c)	1914.10	2.97	11.63	12.17	1886.84
5 wo (a)	1844.04	2.63	9.97		
5 wo (b)	1852.96	2.6	9.89		
5 wo (c)	1870.97	2.02	7.79	9.22	1855.99