

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“VALIDACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO
HIDRÁULICO CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE RESIDUOS
PLÁSTICOS Y BENEFICIOS ASOCIADOS.”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS**

**PRESENTA:
MARIO ERUBEY SORIANO RUELAS**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. JOSÉ MANUEL GUTIÉRREZ MORENO**

**CODIRECTOR DE TESIS:
DR. CARLOS SALAZAR BRIONES**

Dedicatoria

A Dios

A mi familia

A mi novia

Agradecimientos

Agradezco a Dios por el don de la vida que me ha otorgado, por darme salud, paciencia y sabiduría para sobrellevar los obstáculos, los momentos difíciles y por ser mi guía, mi luz, mi camino para poder llegar hasta este momento.

Al Dr. José Manuel Gutiérrez Moreno por su apoyo invaluable como mi director de tesis y disposición mostrada en cada paso de esta etapa académica, por su confianza y paciencia siempre mostrada hacia mí, y por permitirme ser su primer alumno de posgrado al que ha asesorado, gracias por los buenos momentos que pudimos celebrar y compartir mediante el trabajo académico, ha sido una experiencia académica muy enriquecedora. Gracias por los buenos consejos y aportaciones durante esta etapa.

A mi codirector de tesis, Dr. Carlos Salazar Briones, por su asesoría complementaria para mi proyecto de tesis, recomendaciones y su disposición mostrada siempre en todo momento.

Al laboratorio del Programa Educativo de Ingeniero Civil de la FIM, por abrirme su espacio para realizar las pruebas de laboratorio requeridas.

A la Facultad de Ingeniería Mexicali por permitirme ser parte de la matrícula del Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MyDCI).

A la planta de Concretos Kaleb de San Luis Río Colorado, Sonora, un agradecimiento especial al actual jefe de planta y estimado colega, Dr., M.I. e Ing. Ramiro Vázquez Delgado por su asesoría técnica y apoyo fundamental para los resultados de este proyecto de investigación, así como también aprovecho para agradecer a José Quintero por abrirme las puertas de sus instalaciones de la planta para poder desarrollar la parte experimental de esta investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarme el sustento económico para poder desarrollar este posgrado.

A mi familia, mi máximo pilar que me dio soporte en cada paso que fui avanzando durante esta Maestría, estoy infinitamente agradecido por siempre apoyarme en mis decisiones que he ido tomando a lo largo de mi etapa profesional, siendo este posgrado, una etapa sumamente valiosa para aprender y reafirmar el valor de la familia. A mis padres, Mario e Iracema, por siempre confiar en mí y apoyarme en todo lo que ha estado en sus manos. A mis hermanos, Omar y Diego, por su

acompañamiento y apoyo que me han dado durante estos años, así como su paciencia mostrada y comprensión en los momentos adversos que nos tocó vivir. Este logro también es de ustedes familia.

A mi novia, Veronica Mayre, por su amor y apoyo incondicional en cada paso que fui avanzando durante esta etapa de estudios de posgrado, por apoyarme, acompañarme y escucharme en los momentos difíciles, por enseñarme a sonreírle a la vida a pesar de las caídas, por ayudarme a ver ciertas experiencias adversas de forma positiva y por siempre mostrar esa paciencia y comprensión que me alentó a dar lo mejor de mí para llegar a este momento de culminación académica. Siempre estaré agradecido por acompañarme en esta aventura. Te amo.

Por último, agradezco a mi alma mater, la Universidad Autónoma de Baja California, por permitirme formar parte de ella para poder cursar y obtener este grado académico.

A todos, muchas gracias.

Resumen

La industria de la construcción ha efectuado una serie de propuestas relacionadas con la sostenibilidad de los materiales, en este caso, al concreto hidráulico se le ha puesto especial atención por su uso primordial en la infraestructura actual. Entre esta serie de propuestas se ha puesto énfasis en la cantidad de residuos plásticos que son desechados en el medio ambiente, con el propósito de aprovechar este material como agregado plástico en las mezclas de concreto. En la presente investigación se muestra un estudio experimental del diseño de una mezcla de concreto de un módulo de ruptura de 45 kg/cm^2 , reemplazando arena natural por plástico HDPE en porcentajes de 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 15%, 20% y 30% con el propósito de determinar y analizar las propiedades en estado fresco y endurecido de esta mezcla. Se elaboraron 64 especímenes para identificar el comportamiento del concreto sometido a compresión y flexión. Los resultados demuestran que el porcentaje de reemplazo óptimo fue de 5% y 7.5% para fines de resistencia a compresión y flexión respectivamente, teniendo una similitud en los resultados que demuestran otros autores. Finalmente, las investigaciones de la incorporación o sustitución parcial del HDPE en mezclas de concreto se encuentran en una etapa temprana, por lo tanto, el producir y validar resultados favorables permitirá promocionar una alternativa de concreto hidráulico con beneficios asociados que impliquen componentes de la sostenibilidad, tal y como se demuestra en este caso de estudio, por lo que su aplicación puede funcionar en losas para la capa de rodadura de los pavimentos rígidos.

Palabras clave: Agregados plásticos, módulo de ruptura, plástico HDPE, porcentaje de reemplazo.

Abstract

The construction industry has made a series of proposals related to the sustainability of materials, in this case, hydraulic concrete has been given special attention due to its primary use in current infrastructure. Among this series of proposals, emphasis has been placed on the amount of plastic waste that is discarded in the environment, with the purpose of taking advantage of this material as a plastic aggregate in concrete mixtures. This research shows an experimental study of the design of a concrete mix with a modulus of rupture of 45 kg/cm², replacing natural sand with HDPE plastic in percentages of 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 15%, 20% and 30% with the purpose of determining and analyzing the properties in the fresh and hardened state of this mixture. 64 specimens were made to identify the behavior of concrete subjected to compression and bending. The results show that the optimal replacement percentage was 5% and 7.5% for compressive and flexural strength purposes, respectively, having a similarity in the results shown by other authors. Finally, investigations of the incorporation or partial substitution of HDPE in concrete mixtures are at an early stage, therefore, producing and validating favorable results will allow promoting an alternative of hydraulic concrete with associated benefits that involve components of sustainability, as demonstrated in this case study, so its application can work on slabs for the wearing course of rigid pavements.

Keywords: Plastic aggregates, modulus of rupture, HDPE plastic, replacement percentage.

CONTENIDO

1. Marco de la investigación.....	15
1.1. Introducción	15
1.2. Objetivos de la investigación.....	16
1.2.1. General	16
1.2.2. Específicos.....	16
1.3. Hipótesis.....	16
1.4. Justificación	16
2. Revisión de literatura.....	17
2.1. Concreto hidráulico	17
2.1.1. Definición	17
2.1.2. Historia	17
2.1.3. Tipos de concreto y aplicaciones.	21
2.2. Plásticos.....	22
2.2.1. Definición.	22
2.2.2. Historia.	23
2.2.3. Tipos de plásticos.	27
2.2.4. Ventajas de los plásticos.	35
2.2.5. Desventajas de los plásticos.	37
2.2.6. Datos estadísticos de producción y contaminación.	38
2.2.7. Tipos de reciclaje.....	39
2.3. Mezclas de concreto con plásticos.	40
3. Metodología experimental.....	41
3.1. Selección de porcentajes de reemplazo.	43
3.2. Análisis de agregados.....	44
3.2.1. Granulometría.....	49
3.2.2. Densidad.....	64
3.2.3. Absorción.....	73
3.2.4. Peso volumétrico.....	75
3.3. Diseño de mezclas de concreto hidráulico.....	76
3.3.1. Materiales.....	76

3.3.2. Tipos de mezclas.	80
3.3.3. Método de diseño.	80
3.3.4. Proporciones de la mezcla de concreto.	92
3.4. Pruebas al concreto hidráulico.....	93
3.5. Análisis de resultados.	96
3.6. Beneficios asociados.	96
4. Resultados y discusiones.	97
4.1. Pruebas al concreto en estado fresco.	97
4.1.1. Temperatura.	98
4.1.2. Revenimiento.	98
4.1.3. Masa unitaria y rendimiento relativo del concreto.	98
4.1.4. Contenido de aire.	99
4.2. Pruebas al concreto en estado endurecido.....	99
4.2.1. Resistencia a la compresión.....	99
4.2.2. Resistencia a la flexión.	101
5. Conclusiones.....	104
6. Referencias.....	105
7. Anexos.	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Acontecimientos importantes en la historia del concreto del siglo XIX.....	18
Tabla 2. Tipos de concreto y sus aplicaciones.	21
Tabla 3. Propiedades físicas del concreto MR.....	21
Tabla 4. Acontecimientos importantes en la historia de los polímeros.	23
Tabla 5. Clasificación de termoplásticos más comunes.....	27
Tabla 6. Aplicaciones de los plásticos.	36
Tabla 7. Tipos de agregados seleccionados.....	45
Tabla 8. Pruebas a los agregados realizadas.....	49
Tabla 9. Granulometría del agregado grueso de 40 mm.	50
Tabla 10. Granulometría del agregado grueso de 20 mm (capado).	53
Tabla 11. Granulometría del agregado grueso de 20 mm (integral).	53
Tabla 12. Granulometría del agregado grueso de 13 mm.	54
Tabla 13. Granulometría del agregado grueso de 10 mm.	55
Tabla 14. Granulometría del agregado fino.	59
Tabla 15. Granulometría del plástico HDPE.	62
Tabla 16. Densidades de los agregados.....	66
Tabla 17. Cálculo de la densidad del plástico HDPE como agregado fino.	69
Tabla 18. Cálculo de la densidad de la arena con plástico HDPE.	71
Tabla 19. Absorción de los agregados.....	74
Tabla 20. Peso volumétrico de los agregados.	75
Tabla 21. Clasificación de cementos en México.	77
Tabla 22. Clase de resistencia y especificaciones físicas.....	77
Tabla 23. Características especiales.	78
Tabla 24. Tipos de mezclas de concreto.	80
Tabla 25. Muestra parcial de la Tabla 2.1 del ACI 302.	81
Tabla 26. Tabla 6.1. del ACI 302.	82
Tabla 27. Módulo de ruptura de acuerdo con el método AASHTO.....	83
Tabla 28. Tabla 6.2. del ACI 302.	84
Tabla 29. Proporciones de los insumos de la mezcla de concreto para 1 m ³	92
Tabla 30.1. Proporciones de las mezclas de concreto.....	92
Tabla 30.2. Proporciones de las mezclas de concreto.....	93

Tabla 31. Pruebas al concreto en estado fresco y endurecido.	93
Tabla 32. Resultados de desgaste de los agregados.	96
Tabla 33. Tipo de ruptura en resistencia a la flexión.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama conceptual de los polímeros.	22
Figura 2. Representación molecular del polietileno (PE).....	28
Figura 3. Estructura de la cadena molecular del etileno.....	28
Figura 4. Estructura de la cadena molecular del polietileno (PE).	29
Figura 5. Estructura de la cadena molecular del HDPE.	29
Figura 6. Estructura de la cadena molecular del LDPE.....	30
Figura 7. Estructura de la cadena molecular del PET.	32
Figura 8. Estructura de la cadena molecular del PVC.....	33
Figura 9. Estructura de la cadena molecular del PP.....	33
Figura 10. Estructura de la cadena molecular del PS.	35
Figura 11. Distribución de producción de plásticos a nivel mundial.	38
Figura 12. Diagrama de la metodología experimental.....	42
Figura 13. Ubicación de Concretos Kaleb.	45
Figura 15. Ilustración del agregado plástico seleccionado.	47
Figura 16. Muestreo de los agregados.....	50
Figura 17. Proceso de cribado de la grava de 40 mm.	51
Figura 18. Ilustración de la distribución granulométrica de la grava de 40 mm.	52
Figura 19. Pesado de la grava retenida de 10 mm.....	56
Figura 20. Ilustración de la distribución granulométrica de la grava de 10 mm.	57
Figura 21. Ilustración de la distribución granulométrica de los agregados analizados.	58
Figura 22. Pesado del agregado fino retenido de 1.19 mm.....	60
Figura 23. Ilustración de la distribución granulométrica del agregado fino analizado... ..	61
Figura 24. Proceso de cribado del plástico HDPE.....	62
Figura 25. Pesado del plástico HDPE retenido de 10 mm.....	63
Figura 26. Ilustración de la distribución granulométrica del plástico HDPE.	64
Figura 27. Preparación de la grava de 40 mm para determinación de su densidad.....	65
Figura 28. Determinación de la densidad del agregado grueso de 40 mm.	65
Figura 29. Preparación del agregado fino en estado S.S.S.....	66
Figura 30. Determinación de la densidad del plástico HDPE como agregado grueso.	67
Figura 31. Determinación de la densidad del plástico HDPE como agregado fino.....	68
Figura 32. Efecto de flotación del plástico HDPE en agua.	70

Figura 33. Determinación de la densidad de la arena con plástico HDPE.	71
Figura 34. Efecto de flotación del plástico HDPE con arena en agua.	72
Figura 35. Ensayo de peso volumétrico de los agregados.	75
Figura 36. Tabla de diseños de mezclas de concreto en Microsoft Excel.	87
Figura 37. Tabla de captura de datos para análisis de la mezcla.	88
Figura 38. Bandeja horizontal de 100 litros.	94
Figura 39. Muestreo de la mezcla de concreto.	95
Figura 40. Curado de especímenes	95

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Distribución de material por malla.....	89
Gráfica 2. Carta de la potencia.....	89
Gráfica 3. Carta de factor de grosor.....	91
Gráfica 4. Resultados de la resistencia a la compresión a 7 días.....	99
Gráfica 5. Resultados de la resistencia a la compresión a 28 días.....	100
Gráfica 6. Resultados de la resistencia a la flexión a 7 días.....	101
Gráfica 7. Resultados de la resistencia a la flexión a 28 días.....	101

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Contenido de material cementante mínimo promedio.	84
Ecuación 2. Contenido de material cementante máximo promedio.	85
Ecuación 3. Cantidad de agua requerida.	85

1. Marco de la investigación

1.1. Introducción

El concreto es el material con mayor demanda para la construcción de obras civiles por sus propiedades físicas que se ajustan en la forma y resistencia de los elementos estructurales solicitados, además de la economía que ofrece (Abeyasinghe et al., 2021; Ceballos, 2016; McCormac, 2011; Wang et al., 2017). Se estima que hasta el año 2019 se producían 2500 millones de toneladas de concreto por año, lo que demuestra la gran demanda de producción a nivel global (Molina et al., 2021; Nadimalla et al., 2019). Sin embargo, hoy en día uno de los compromisos y requisitos que implica usar este material es realizar esfuerzos por reducir su huella de carbono, es decir, realizar un concreto que ofrezca beneficios asociados a la sustentabilidad (Ceballos, 2016; Wang et al., 2017).

La incorporación de residuos plásticos en las mezclas de concreto es una alternativa que va relacionada con la sustentabilidad debido a que contribuye a la mitigación de residuos plásticos en los vertederos, además, se abre la posibilidad de reducir el uso de agregados naturales por incorporar estos residuos como un agregado plástico, lo que representa un producto con viabilidad económica y ecológica (Abeyasinghe et al., 2021). El plástico ha sido un material que ha traído beneficios en la industria de la manufactura, pero una vez que es utilizado para su uso destinado, usualmente termina convirtiéndose en un desecho que afecta al medio ambiente, teniendo un periodo de descomposición entre los 500 y 1000 años (LeBlanc, 2015; Tamrin & Nurdiana, 2021). Para el año 2016 se tenían cifras aproximadas de 24.14 millones de toneladas de generación de residuos plásticos, las cuales van en aumento y la necesidad de incorporar estos residuos en elementos constructivos ha despertado la investigación y desarrollo de mezclas de concreto con la adición de plásticos reciclados, lo que relaciona el sector del reciclaje con el sector de la construcción (Kaza et al., 2018; Napper & Thompson, 2020).

Uno de los plásticos más producidos es el HDPE (Polietileno de Alta Densidad), encontrándose en tercer lugar de producción mundial con un 13%, ofreciendo un adecuado desempeño en el concreto sustentable por considerarse un plástico que solo ha tenido un solo uso (Napper & Thompson, 2020; Patrício Silva et al., 2020). La literatura respalda este desempeño por su aplicación en elementos estructurales y no estructurales

(Lopez et al., 2019; Stana & Pešic, 2016). El objetivo de este trabajo es comparar el desempeño del concreto sustentable en sus diferentes porcentajes de reemplazo de arena-plástico HDPE para encontrar su porcentaje ideal y optimo que permita obtener una buena trabajabilidad y durabilidad, para compararlo con un concreto hidráulico convencional.

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. General

Evaluar la propuesta de diseño de mezclas de concreto hidráulico con incorporación de residuos plásticos para su aplicación en losas de la capa de rodadura de pavimentos rígidos, así como en pisos industriales y obras complementarias.

1.2.2. Específicos

- Determinar las características de los materiales para concreto hidráulico; agregados y HDPE en distintas proporciones.
- Determinar y evaluar las propiedades de las mezclas de concreto con plástico reciclado en estado fresco.
- Evaluar a partir de las propiedades del concreto fresco cuales son los diseños de mezclas de concreto hidráulico con incorporación de residuos plásticos que entregan el mejor desempeño.
- Evaluar las propiedades del concreto con adición de residuos plásticos en estado endurecido.

1.3. Hipótesis

Es posible elaborar un concreto hidráulico con residuos de HDPE para losas de pavimentos rígidos con propiedades y desempeño similares a los concretos tradicionales, que proporcione un nivel de servicio adecuado y eficiente.

1.4. Justificación

Mediante esta investigación se pretende disminuir la cantidad de desechos plásticos en los tiraderos o rellenos sanitarios y aumentar su porcentaje de uso en el sector de la construcción, específicamente en elaboración de concreto, promocionado un nuevo

diseño de mezclas para las capas de rodadura o losas de los pavimentos rígidos e incluso para las losas de parques industriales de la ciudad de Mexicali.

Con base a los estudios que se realicen y la información que se obtenga a lo largo de esta investigación se logrará obtener un acercamiento a mediano plazo de los beneficios que arrojará la aplicación de este tipo de material para la construcción, logrando favorecer al sector de la construcción, especialmente en el área de infraestructura vial debido a la propuesta de concreto sustentable con propiedades mecánicas similares a las de un concreto convencional para las capas de rodadura o losas de los pavimentos rígidos y losas para parques industriales.

2. Revisión de literatura

2.1. Concreto hidráulico

2.1.1. Definición

El reglamento del American Concrete Institute 318-19 ([ACI 318, 2019](#)) define al concreto como la mezcla de cemento portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos. Dicho de otra manera: *“Es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava (piedra triturada piedra machacada, pedrejón), creando una masa similar a una roca.”* ([Kosmatka, 2004](#)).

Es el material de construcción más utilizado en el mundo debido a su capacidad de adoptar cualquier forma a partir del cimbrado, la resistencia que desarrolla en elementos estructurales y su economía, entre otras ventajas ([de Brito et al., 2018](#); [McCormac, 2011](#)).

2.1.2. Historia

El uso del concreto tuvo sus inicios en la antigüedad a raíz de la construcción de una de las estructuras que aún se conservan como es el panteón de Roma, siendo una de las obras con más de 2000 años de existencia, dando ejemplo de cómo la tecnología romana demostraba su capacidad de poder tener un buen manejo del concreto estructural, el cual en ese entonces era elaborado con pasta de caliza calcinada (cal viva) y con adiciones de ceniza puzolánica, siendo la cal, un conglomerante que se utilizaría por

bastante tiempo en lo que se buscaba otro material que junto con la cal pudiera tener una resistencia adecuada al momento de entrar en contacto con el agua (ACI Committee E-701, 2001; Schneider et al., 2011; Walker & Pavía, 2011).

Fue durante el siglo XVIII que empezó a despertar el interés de investigar y probar a los cementos como conglomerantes que pudieran tener mejores desempeños que los yesos y cales hidráulicas que se utilizaban por ser la única opción que se tenía hasta ese momento (Torres, 2012). A partir de 1756, las investigaciones dieron inicio por parte de un ingeniero de la ciudad de Yorkshire, Inglaterra llamado John Smeaton, quien sería participe de la construcción del Faro de Eddystone, una de las construcciones con mayor relevancia en la historia del cemento en el país de Gales, la cual entraría en servicio en el año de 1759, pero antes de esa fecha, para lograr concretar esta obra, Smeaton optó por basarse en los métodos que utilizaron los romanos para elaborar el cemento a causa de dos edificaciones que previamente intentaron construirse en el mismo sitio, pero sin resultados favorables por su escasa resistencia que no era apta para las funciones a las que estarían expuestas. Al obtener éxito en esta construcción, se pudo denotar el uso del primer conglomerante hidráulico que fue resistente al agua y que además contribuyó a que el faro pudiera resistir los impactos de los azotes de las olas y el desgaste de las sales, siendo la cimentación de esta estructura lo que en la actualidad todavía se conserva.

Estos avances en las investigaciones del cemento serían la pauta para abrir caminos hacia nuevos descubrimientos en los años siguientes, añadiendo a esto que en el siglo XIX trascendieron las investigaciones y se dieron aportaciones importantes para la industria del concreto las cuales se enlistan y describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Acontecimientos importantes en la historia del concreto del siglo XIX.

Periodo	Evento
1811	Edgar Dabbs obtuvo una patente para producir concreto empleando arcilla y polvo de los caminos y cal.
1824	Joseph Aspdin en Inglaterra, influido por los trabajos de Dabbs, daba el nombre de cemento portland y patentaba un material que amasado con agua y con arena se endurecía, formando un

	conglomerado de aspecto parecido a las calizas de la isla de Portland.
1825	Se produce el primer concreto moderno en América en la construcción del canal de Erie, utilizándose el cemento hecho de la cal hidráulica encontrada en los condados de Madison en Nueva York, de Cayuga y de Onondaga.
1832 - 1835	Se conoce la primera referencia del uso de concreto reforzado cuando Sir Marc Isambard y Francois Martin Le Brun erigieron, en Inglaterra y Francia, respectivamente, estructuras de este material, tales como arcos y edificaciones.
1835	Se empleó por primera vez el concreto a gran escala para la construcción de muros, tejas, marcos de ventana y trabajos de decoración en una edificación para vivienda en Swanscombe, Inglaterra.
1838	Brunel emplea por primera vez un cemento procedente de la fábrica de Aspdin, en la construcción de un túnel bajo del río Támesis en Londres, Inglaterra.
1845	Isaac Johnson realiza un prototipo del cemento moderno, logrando conseguir temperaturas suficientemente altas y clinkerizar la mezcla de arcilla y caliza empleada como materia prima. Tomando como base los experimentos de Johnson, la fabricación de cemento Portland se inició en varias plantas, no solo en Inglaterra, sino también en toda Europa.
1854	William Wilkinson solicitó la patente de un sistema que incluía armaduras de hierro para la mejora de la construcción de viviendas, almacenes y otros edificios resistentes al fuego.
1860	El francés Joseph Monier patentó varios métodos del concreto armado.
1892	François Hennebique ideó y patentó un sistema convincente de concreto armado.
1895	François Hennebique utilizó su patente en la construcción de una fábrica de hilados en la ciudad de Tourcoing en Lille, Francia.
1887	Fue desarrollado el primer cemento blanco.
1903	Fue perfeccionado el cemento blanco, logrando un portland blanco de mayor calidad.

Fuente: Torres (2012).

El siglo XX sería el auge de la industria del concreto por las aportaciones de los químicos franceses Louis Vicat y Henry Le Chatelier, que en conjunto con el alemán Michaelis obtendrían su producto idóneo, un cemento con calidad homogénea. A partir de la intervención de los procesos industriales en la fabricación de estos materiales, ocurre la invención del horno rotatorio para calcinación y el molino tubular para poder producir cemento en grandes cantidades a nivel comercial, además, Juergen Hinrich Magens logró transportar el primer m³ de concreto producido en una planta mezcladora estacionaria a través de un vehículo especial, el cual fue patentado entre 1903 y 1907.

Después de estos logros, en 1930 se abriría al público comercial la venta de un único tipo de cemento portland, sin embargo, dentro de las necesidades de esta industria, se empezaron a desarrollar otros tipos de cemento, al igual que el desarrollo de las fibras y los aditivos para cubrir otras necesidades del mercado, por lo que en 1960 se continuaría estudiando el uso de estos últimos, particularmente por el desarrollo que estaba teniendo el concreto premezclado, trayendo consigo el desarrollo de una nueva generación de aditivos con el propósito de reducir agua en las mezclas de concreto, denominándose superplastificantes o aditivos reductores de agua de alto rango, incluyendo aquellos aditivos inclusores de aire para climas fríos y aquellos que funcionan como acelerantes para obtener concretos de alta resistencia.

[Torres \(2012\)](#) menciona que, en el actual siglo XXI, el uso de materiales reciclados dentro del concreto está obteniendo mayor relevancia, entre estos materiales se encuentran las cenizas volantes, que contribuyen a la disminución de las emisiones de dióxido de carbono que produce el cemento. Dentro de estos materiales reciclados, también es importante mencionar a los residuos plásticos, que han tenido una mención destacada dentro de investigaciones que buscan y fundamentan la incorporación de residuos plásticos en las mezclas de concreto, ofreciendo una alternativa que va relacionada con ciertos beneficios que se enlazan con la sustentabilidad debido a que contribuye a la mitigación de residuos plásticos en los vertederos, además de que se abren áreas de oportunidad para reducir el uso de agregados naturales, lo que representa un producto con viabilidad económica y ecológica ([Abeyasinghe et al., 2021](#)).

2.1.3. Tipos de concreto y aplicaciones.

De acuerdo con su función que desempeñan, la N-CMT-2-02-005/04 del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) clasifica al concreto hidráulico de la siguiente forma (Tabla 2):

Tabla 2. Tipos de concreto y sus aplicaciones.

Clase	Masa volumétrica (kg/cm³)	Resistencia (kg/cm²)	Aplicaciones
I	2200 – 2400	≥ 250	Escuelas, teatros, edificios públicos, bibliotecas, cines, centros comerciales, etc.
II	1800 - 2200	250 <	Pisos, losas, muros, cimentaciones, banquetas, guarniciones, etc.

Fuente: IMT (2004).

Por la característica de esta investigación, es importante mencionar que existen concretos particulares para aplicarse en elementos estructurales que estén soportados sobre terreno y que por consecuencia estén sujetos a esfuerzos de flexión. Estos concretos llevan por nombre concretos de Modulo de Ruptura (MR) y en la Tabla 3 se describen sus propiedades principales.

Tabla 3. Propiedades físicas del concreto MR.

Masa volumétrica (kg/cm³)	Resistencia (kg/cm²)	Aplicaciones
2300	36 - 50	Carreteras, vialidades urbanas, estacionamientos, pistas de aeropuertos, losas sobre terreno, patios de maniobras

Fuente: Cemex Colombia (2019).

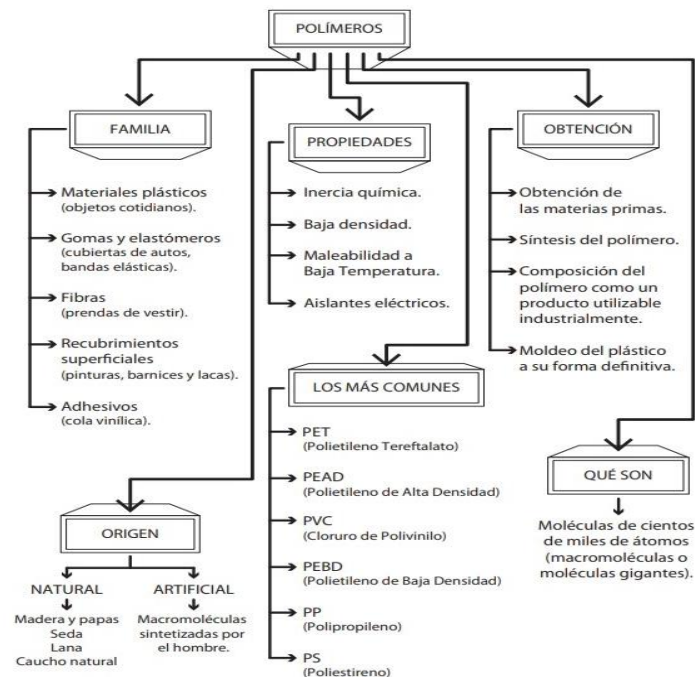
2.2. Plásticos.

2.2.1. Definición.

El término plástico proviene de la palabra griega “plastkos” que significa “capaz de ser moldeado” o “que puede ser moldeado por el calor”, la cual se usó originalmente para denotar a todo material que era fácil de modelar, así se tratara de barro, yeso, cerámica o cera. Actualmente, se aplica para describir una amplia variedad de materiales que difieren por sus propiedades físicas, químicas, estructura molecular y composición, los cuales tienen un escaso grado de movilidad y facilidad para adquirir cierta forma (Figura 1) (Ávila et al., 2015, como se citó en Martínez et al., 2015).

Los plásticos también son comúnmente llamados “polímeros” en virtud de que son productos orgánicos, a base de carbono, con moléculas de cadenas largas (Góngora, 2014). Los polímeros son moléculas o sustancias de gran tamaño que se componen de la reproducción o iteración de unidades químicas simples de pequeñas dimensiones, las cuales mantienen su unión mediante enlaces químicos (Bahadur & Sastry, 2005; Billmeyer, 2012).

Figura 1. Diagrama conceptual de los polímeros.



Fuente: Hermida (2014).

2.2.2. Historia.

Los plásticos nacen de la necesidad del ser humano de crear y obtener un material que satisficiera ciertas necesidades que no podían ser cubiertas por los materiales que se encontraban en la naturaleza. A partir de la manipulación y el control de polímeros naturales, se fueron produciendo plásticos cada vez más modernos (polietileno, polipropileno), entrando en la categoría de los materiales que vinieron a revolucionar el mundo de la industria a inicios del siglo XX, destacando la industria del embalaje, la automotriz, la eléctrica y la electrónica, además de las industrias correspondientes a la edificación y la construcción (Correia et al., 2014; García, 2009).

El camino para obtener los materiales plásticos (polímeros) que conocemos hoy en día se remonta a los años 80 con el descubrimiento del primer polímero artificial denominado la *bakelita*, siendo el punto de partida para continuar con el desarrollo y la invención de los polímeros de alto desempeño (Tabla 4).

Tabla 4. Acontecimientos importantes en la historia de los polímeros.

Periodo	Evento
1840 – 1920	Vulcanización del caucho natural por Charles Goodyear, Schonbein hizo nitrato de celulosa, Menard y Hyatt sintetizaron colodión y celuloide respectivamente. Chardonnet preparó fibras de celulosa regeneradas, Graham clasificó las sustancias en cristaloides y coloides, se hicieron oligómeros de etilenglicol y aminoácidos, Baekeland preparó la primera baquelita polimérica sintética.
1920	Staudinger dio el concepto de macromoléculas, se sintetizaron resinas alquídicas, PVC plastificado, U-F y resinas de tiocol.
1930	Síntesis y comercialización de resinas de melamina, polimetilmetacrilato (Perspex, ICI; lucite, DuPont), neopreno, poliestireno, polietileno y nylon 6, 6 (por Carothers en DuPont).
1940	Se patentaron el PET y los poliésteres insaturados (terileno, ICI; dacron, DuPont) y el teflón (de Plunkett en DuPont).
1950	Se informó sobre la síntesis y el desarrollo de ABS, spandex (elastómeros de poliuretano), HDPE (por Ziegler), PP estereorregular (por Natta) y policarbonatos.

1960	Se desarrollaron elastómeros termoplásticos ionoméricos, aramidias (kevlar), polímeros ignífugos y fibras de carbono (PAN ciclado, deshidrogenado).
1970	Se inventaron los polímeros cristalinos líquidos termo trópicos.
1980	Se desarrolló la polieteretercetona (PEEK).
1990	Desarrollo de compuestos poliméricos, polímeros de alto rendimiento (PET, HDPE, PP), diseño y síntesis de vehículos poliméricos biodegradables para la liberación sostenida de formulaciones farmacéuticas y fertilizantes, diseño de hidro y micro geles a base de polímeros solubles en agua, desarrollo de polímeros conductores, electrolito sólido polimérico, electroluminiscente polímeros y síntesis de estrella multifuncional y dendrímeros.

Fuente: Bahadur & Sastry (2005).

A través de esta tabla, se describen los sucesos en un periodo aproximado de 150 años, que dieron lugar al desarrollo de polímeros artificiales desde el siglo XIX mediante la transformación de polímeros naturales, tales como la seda, la lana, el algodón, la celulosa, el almidón, las proteínas, el caucho natural (látex o hule), etc., hasta finales del siglo XX. El primer acontecimiento ocurre en el vulcanizado del caucho, polímero artificial desarrollado por Charles Goodyear en el año de 1839 y que estuvo en función de la industria automotriz que, debido a su constante crecimiento y demanda del hule natural y la limitación de este último, la alternativa de cambiar este insumo natural por uno artificial resultó en el comienzo de las primeras intervenciones de polímeros naturales a ciertas industrias, en este caso la correspondiente a la manufactura (Bahadur & Sastry, 2005). Más tarde, un acontecimiento que estableció la invención oficial del primer polímero artificial ocurrió en el año de 1909 cuando un químico del país estadounidense llamado Leo Hendrik Baekeland, produjo un polímero a base de moléculas de fenol (ácido félico) con formaldehído (metanal) expuesto a altas temperaturas y a presión, obteniendo un producto denominado: "la baquelita". Este polímero artificial o totalmente sintético fue el primero en ser reconocido en el marco de la historia, con propiedades peculiares: se podía amoldar de acuerdo con el uso destinado a emplearse, siempre y cuando se le diera la forma antes de enfriarse, además de que se convirtió en un material

que no conducía electricidad, poseía resistencia al agua y a los disolventes, y se convertía en un material duro e inerte al contacto con sustancias químicas.

Durante las décadas de 1920 y 1930 el policloruro de vinilo (PVC) tuvo lugar en la fabricación de polímeros al igual que el poliestireno, conllevando a la pronta comercialización del polietileno, el poliestireno, el polimetilmetacrilato (plexiglás), para usarse como un reemplazo del cristal, el caucho de neopreno, el nylon que sería el primer plástico de alto desempeño, la resina de melamina y los poliésteres (Bahadur & Sastry, 2005). Esta comercialización fue puesta en marcha de manera oportuna debido a que en ese entonces se presencié la Segunda Guerra Mundial (1939-1945) y esto trajo como consecuencia la reducción de suministros de ciertas materias primas para varios países, recurriendo a la industria de los plásticos, la cual aprovechó la oportunidad para dar a conocer su capacidad de reemplazar ciertos materiales de forma ilimitada, teniendo como protagonista al país estadounidense, que se vería afectado, pero a su vez puso empeño en el desarrollo y la producción de los plásticos, destacando en 1940 el descubrimiento accidental del politetrafluoroetileno (PTFE), conocido como teflón comercialmente, por el químico Roy J. Plunkett en la compañía DuPont en Estados Unidos, quien dispuso en el comercio este material que fue utilizado para utensilios de cocina, aplicándose especialmente en sartenes antiadherentes, debido a que es el polímero más inerte comúnmente conocido.

Después de la etapa bélica, los siguientes años significarían una época trascendente dentro de la industria polimérica a raíz del continuo desarrollo de polímeros sintéticos, que en primera instancia, la atención puesta en los policarbonatos, los acetatos y las poliamidas, conduciría a poner a prueba otros productos a condiciones ambientales extremas, como por ejemplo, los materiales sintéticos que reemplazaban a los metales que componían a la maquinaria, los cascos de seguridad, conllevando estos experimentos a un descubrimiento y desarrollo continuo de plásticos sintéticos que fueran cumpliendo las necesidades que iban surgiendo en las diversas industrias. Entre estas necesidades, surgió aquella que llevaría al químico alemán, Karl Ziegler, a desarrollar un polímero sintético de alto desempeño que se colocaría en la historia de estos materiales como un desarrollo de alto impacto, produciendo entonces al

denominado polietileno lineal, en la actualidad llamado polietileno de alta densidad (HDPE), el cual tendría que pasar por ciertas condiciones de presión y temperatura para su fabricación, ocurriendo este suceso en 1953 ([Bahadur & Sastry, 2005](#)). El desarrollo de este material sería la base para que en el año siguiente (1954) el también químico pero de nacionalidad italiana, llamado Giulio Natta, desarrollara el polipropileno (PP), resultado que se debe a la polimerización Ziegler-Natta, concepto por el cual se hace referencia a los descubrimientos y desarrollos de estos dos plásticos y que en el año de 1963, estos estudios les permitieron obtener y compartir el Premio Nobel de Química, representando este premio el aporte y la disposición de dos de los materiales (HDPE y PP) con mayor demanda en la actualidad dentro de la industria de los plásticos.

Todos estos descubrimientos y desarrollos permitieron trascender a los polímeros dentro de su propia historia y satisfacer las necesidades que empezaba a demandar la vida moderna, las cuales implicaban polímeros con ciertas especialidades y de alto desempeño, lo que representaron retos para los químicos, físicos y tecnólogos especializados en el estudio de estos materiales, demostrándose el mayor apogeo de estas invenciones en el último medio siglo y validando estos conocimientos y aportaciones para colocar a la química de los polímeros como una ciencia integral ([Bahadur & Sastry, 2005](#)). Sin embargo, si se retrocede al año de 1930 cuando los plásticos se encontraban en su pleno apogeo de desarrollo e incorporación a la industria, conllevaron a altas demandas de producción, propiciando una cantidad 1.7 de millones de toneladas de plásticos que se empezaron a ver reflejadas a partir de la segunda mitad del siglo XX, alcanzando las 280 millones de toneladas después de 2010, específicamente en 2011, y 6 años más tarde las cifras continuarían aumentando, llegando a los 348 millones de toneladas, dejando en evidencia la tendencia de cifras a la que se llegará en los años siguientes y la cantidad de residuos plásticos que se encuentran y que se encontrarán desechos en el medio ambiente por las carencias de reciclaje actual, lo que implica un esfuerzo por reutilizar paulatinamente los plásticos en desuso ([Correia et al., 2014](#); [Tamrin & Nurdiana, 2021](#)).




Los avances científicos descritos que corresponden a la ciencia de los polímeros continúan en una mejora continua, pero en los tiempos actuales, ya no es suficiente con

solo mejorar los plásticos vírgenes para su uso único, sino que hay que identificar áreas de oportunidad que permitan hacer un segundo uso a los residuos plásticos, para lo cual las ciencias de la física, la biología, la ingeniería y la tecnología han demostrado que existen alternativas de reutilizarlos, haciendo énfasis en la ingeniería y un mayor énfasis en ramas como la ingeniería civil, donde se ha demostrado en el transcurso del siglo XXI a través de varios estudios a nivel internacional, la factibilidad de incorporar o sustituir plásticos reciclados en mezclas de concreto hidráulico por las propiedades físicas y químicas que se obtienen al combinar estos dos materiales. Estos estudios ofrecen resultados prometedores que, mediante el desarrollo y progreso de estas ciencias de materiales poliméricos y de construcción, se escribirá un capítulo más en la historia de los polímeros.

2.2.3. Tipos de plásticos.

Entre la gama de plásticos, estos se clasifican en base a sus propiedades térmicas que desarrollan cuando son sometidos a ciertas temperaturas (Tabla 5). Además, cada uno de estos tipos poseen un código de identificación de acuerdo con la Sociedad de Industrias de Plástico (SPI).

Tabla 5. Clasificación de termoplásticos más comunes.

Código	Nombre	Temperatura de procesamiento (°C)	Tiempo que tarda en degradarse
	Politereftalato de etileno (PET)	250 a 260	500 años
	Polietileno de alta densidad (HDPE)	130	150 años
	Policloruro de vinilo (PVC)	75 a 90	500 años



Polietileno de baja densidad (LDPE)

110

150 años



Polipropileno (PP)

160 a 170

400 años



Poliestireno (PS)

70 a 115

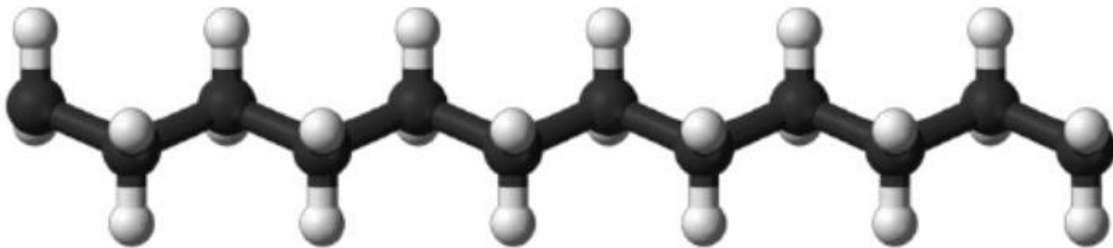
500 años

Fuente: Dirección de Proyectos de Agua, Suelo y Residuos (DPASR, 2001).

2.2.3.1. Polietileno (PE).

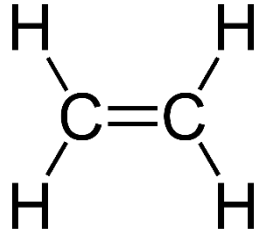
El polietileno es un polímero sintético termoplástico compuesto por moléculas de átomos de carbono e hidrógeno (CH_2) $_n$ que se obtiene por polimerización del etileno (Figura 2, 3 y 4), donde este proceso químico está en función de sus propiedades químicas (inerte) y mecánicas (lubricidad, resistencia al impacto y abrasión). Es un material parcialmente cristalino y amorfo, de color blanquecino y translucido. Los diferentes tipos de polietileno que son comercializados se obtienen mediante diferentes condiciones de operación que dependen de la reacción de polimerización.

Figura 2. Representación molecular del polietileno (PE).



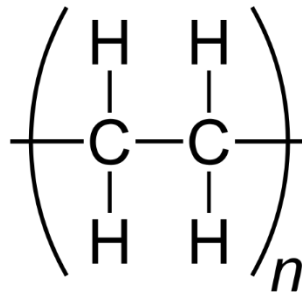
Fuente: López et al. (2015).

Figura 3. Estructura de la cadena molecular del etileno.



Fuente: <https://e7.pnggg.com/pngimages/590/136/png-clipart-formate-chemistry-functional-group-ethylene-chemical-bond-others-angle-white.png>

Figura 4. Estructura de la cadena molecular del polietileno (PE).

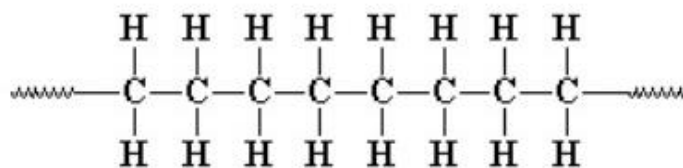


Fuente: <https://img2.freepng.es/20180625/tfj/kisspng-monomer-polymer-high-density-polyethylene-polyviny-unit-5b31646219b601.9931681415299636181053.jpg>

2.2.3.1.1. Polietileno de alta densidad (HDPE).

El HDPE (High Density Polyethylene, por sus siglas en inglés) es un polímero sintético termoplástico perteneciente a la familia del Polietileno (PE) que, por consecuencia, también está formado por cadenas de hidrocarburos, es decir, cadenas o ramificaciones compuestas por Hidrogeno y Carbono, pero en menor medida, lo que se traduce en bajos niveles de ramificaciones laterales en su composición molecular por sus unidades repetitivas de etileno, las cuales son cadenas lineales (Figura 5) (Abeyasinghe et al., 2021; Andrew & Allison, 2006). Esto constituye al HDPE como un plástico denso (0.94 - 0.96 g/cm³), dúctil y con mayor rigidez en comparación con otros polímeros, además de poseer una mayor flexibilidad (204 – 459 kg/cm²) al momento de efectuarse fuerzas o cargas sobre estos materiales (Andrew & Allison, 2006; Bahadur & Sastry, 2005).

Figura 5. Estructura de la cadena molecular del HDPE.



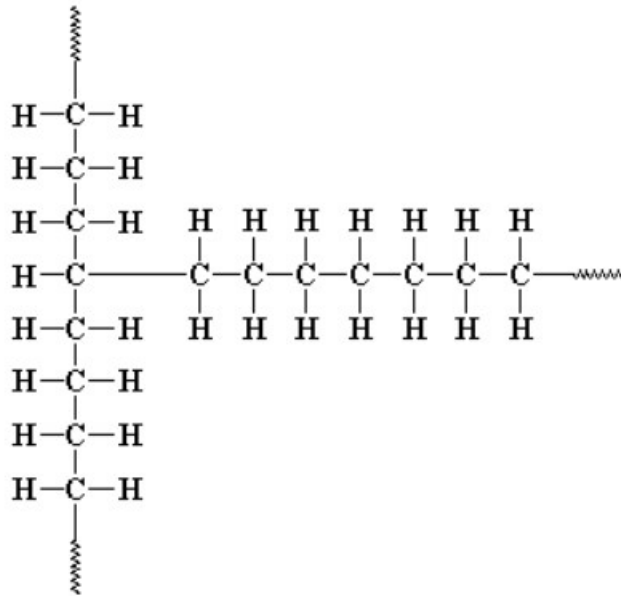
Fuente: <http://www.pi-dir.com/quimica/industria/polietileno.htm>

La figura describe el comportamiento lineal de este polietileno, lo que logra que al efectuarse el efecto de cristalización en un 90%, el cual es de los porcentajes más altos respecto a otros polímeros, el material tenga una densidad alta, a raíz de la cadena de polimerización lineal (Billmeyer, 2012; Hermida, 2011). Esto permite que el HDPE tenga usos amplios en la fabricación de tuberías y sea aplicable en moldeados por inyección y soplado, añadiendo su uso para artículos de consumo en el hogar como envases de leche, envases de detergente y vasos base de botellas plásticas de refrescos (Andrew & Allison, 2006; Tchobanoglous & Kreith, 2002). Los productos obtenidos mediante este polímero lineal poseen rigidez y resistencia a la permeabilidad, incluyendo la capacidad de poder estar en contacto con sustancias químicas agresivas, como es el caso de los contenedores donde se almacenan líquidos que no son capaces de degradarlos, siendo una de entre tantas razones por las cuales el HDPE se encuentra en la lista de los plásticos con mayor producción y uso.

2.2.3.1.2. Polietileno de baja densidad (LDPE).

Entre otros de los polímeros derivados del PE, tenemos al Polietileno de Baja Densidad (Low Density Polyethylene, por sus siglas en inglés) que se define como un sólido parcialmente cristalino (alrededor del 50%) conformado por unidades repetitivas de etileno y con un alto nivel de ramificaciones, convirtiéndolo en un plástico con densidades bajas que van de los 0.91 g/cm³ hasta los 0.92 g/cm³ (Andrew & Allison, 2006; Bahadur & Sastry, 2005; Billmeyer, 2012). Su baja cristalinidad ocasiona que su cadena molecular este compuesta por altos niveles de ramificaciones (Figura 6).

Figura 6. Estructura de la cadena molecular del LDPE.



Fuente: <http://www.pi-dir.com/quimica/industria/polietileno.htm>

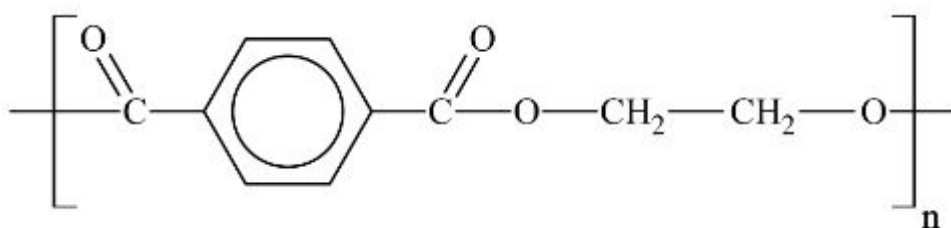
A diferencia del HDPE, este polietileno de baja densidad posee ramificaciones laterales, lo que le permite ser un plástico moderadamente rígido y resistente a los desgarros e impactos con mayor amplitud, por lo que requieren deformaciones a partir del 20 % para empezar a ceder su capacidad de resistencia y posteriormente terminar en una ruptura (Andrew & Allison, 2006). De forma comercial, se producen bolsas utilizadas en supermercados y bolsas de basura, además que se ha destinado su uso para la elaboración de empaques, bolsas y materiales de recubrimiento en los sectores agrícolas y constructores (Andrew & Allison, 2006; Hermida, 2011).

2.2.3.2. Tereftalato de polietileno (PET).

El tereftalato de polietileno (PET) es un polímero semicristalino con alta resistencia mecánica y tenacidad, así como resistencia hidrolítica, química y a disolventes (Jahidul Islam et al., 2016). También se puede definir como una resina plástica utilizada para fabricar envases, en particular botellas de refrescos (Tchobanoglous & Kreith, 2002). Este plástico, por sus siglas en inglés (Polyethylene Terephthalate) se encuentra entre aquellos que son mayormente producidos y utilizados a nivel mundial, prueba de ello, lo indican las cifras de producción mundial anual desde 1950, donde inicialmente se producían 1.7 millones de toneladas, alcanzando los 280 millones de toneladas hasta el

año de 2011 (Correia et al., 2014). Al igual que el HDPE y el LDPE, pertenece al grupo de polímeros derivados del PE, por lo que químicamente también se conforma de unidades repetitivas de hidrocarburos (hidrogeno y carbono), pero a pesar de ser un polímero lineal, este posee una característica que lo diferencia de los otros PE, el estar conformado por oxígeno, lo que le da lugar de poseer el nombre de tereftalato. En otras palabras, el PET está constituido por grupos etileno y tereftalato como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Estructura de la cadena molecular del PET.



Fuente: <https://www.arapack.com/faq/que-es-el-pet/>

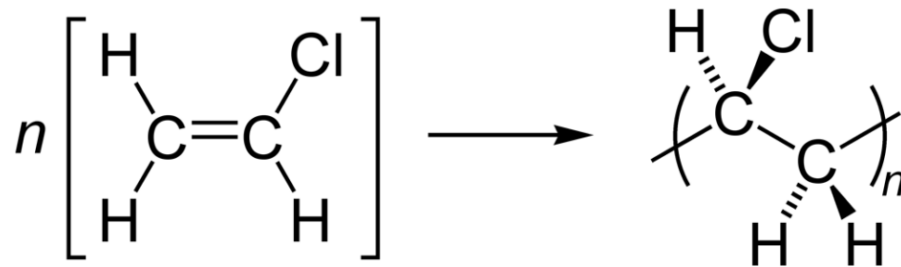
Esta muestra de unidades moleculares del PET, permite que sea considerado como un Poliester, cuya principal característica es la presencia de enlaces tipo éster ($-\text{CO}-\text{O}-$) (Ávila et al., 2015, como se citó en Martínez et al., 2015). Su uso masivo como envase para bebidas permite que sea considerado dentro de la categoría de los termoplásticos de alta calidad. De acuerdo con Correia et al. 2014, la producción del PET tuvo un aumento de 119,000 a 19,600,000 toneladas durante un periodo de aproximado de 60 años (1950 - 2011). Posee una cristalinidad del 30 al 40% y una densidad en un rango comprendido de $1.33 - 1.38 \text{ g/cm}^3$ (Ávila et al., 2015, como se citó en Martínez et al., 2015). Este último parámetro depende de la velocidad de enfriamiento a la que suele ser sometido este tipo de polímeros durante su proceso de fabricación, razón por la cual el PET adopta la textura y apariencia transparente.

2.2.3.3. Policloruro de vinilo (PVC).

Es un plástico fabricado por polimerización de cloruro de vinilo con catalizadores de peróxido (Tchobanoglous & Kreith, 2002). Se conforma de cloro, carbono e hidrógeno (Figura 8), elementos químicos que hacen de este polímero, un producto físicamente

fuerte, con efectos de cristalización bajos por sus densidades que comprenden de 1.16 a 1.45 g/cm³, lo que ocasiona una baja resistencia a temperaturas frías, pero con alta resistencia a temperaturas altas. La polimerización del monómero de cloruro de vinilo trae como resultado la producción del PVC.

Figura 8. Estructura de la cadena molecular del PVC.



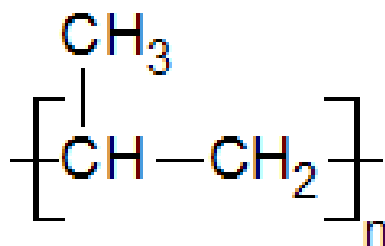
Fuente: <https://www.lifeder.com/policloruro-vinilo/>

Esta configuración molecular hace del PVC un plástico insoluble que le permite tener usos para envases, tuberías, conductos, muebles, aislantes, botellas de detergentes, aceites comestibles y vinagre, entre otros (Ávila et al., 2015, como se citó en Martínez et al., 2015; Hermida, 2011). Su bajo costo le permite ser un material versátil que se ha ido adoptando en diversas industrias, tales como la construcción, energía, salud.

2.2.3.4. Polipropileno (PP).

El polipropileno es un termoplástico semicristalino, que se produce polimerizando propileno en presencia de un catalizador estereoespecífico. Al igual que los PE, dentro de su estructura molecular se pueden encontrar los mismos elementos químicos, pero con diferentes funciones, debido a que se pueden encontrar radicales de grupo de metilo (CH₃) que en conjunto con los metilenos (CH₂) dan lugar a su composición final (Figura 9). Corresponde al plástico más nuevo que se fabrica en gran volumen, también es el más ligero y cristalino (Hermida, 2011).

Figura 9. Estructura de la cadena molecular del PP.



Fuente: <https://www.textoscientificos.com/polimeros/moleculas>

Es el polímero más ligero dentro de los plásticos más comunes e importantes, teniendo una densidad de 0.90 a 0.91 g/cm³, propiciando altos niveles de cristalinidad que le permiten ser resistente cuando es sometido a fuerzas de tracción, siendo un material rígido y durable (Bahadur & Sastry, 2005; Billmeyer, 2012).

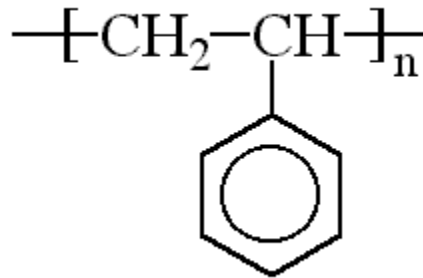
El polipropileno, cuya estructura química general se muestra, constituye aproximadamente el 30% del polímero que se produce actualmente en el mundo. Encontramos polipropileno en una amplia gama de productos desechables y duraderos. Por ejemplo, los recipientes de alimentos aptos para el lavavajillas, las etiquetas de plástico de las botellas de refrescos, las fibras de las alfombras para interiores y exteriores, el respaldo de tela no tejida de los pañales desechables, las toallitas limpiadoras, los forros para el lavavajillas, las telas aislantes térmicas y los juguetes para niños se fabrican con polipropileno. Esta amplia variedad de aplicaciones se debe a la resistencia, dureza y alto punto de fusión de la resina en relación con otros polímeros económicos, así como a la facilidad con la que se procesa (Andrew & Allison, 2006).

2.2.3.5. Poliestireno (PS).

El poliestireno es un polímero sintético hecho del monómero de estireno. Existen tres grupos principales de polímeros que contienen estireno, que son utilizados para la fabricación de productos plásticos a nivel comercial y entre ellos se tiene al poliestireno puro (Andrew & Allison, 2006). Es un polímero termoplástico, lineal, atáctico, amorfo y transparente que en condiciones ambientales se convierte en un plástico quebradizo y vítreo, además que es inflamable y termina siendo atacado por los disolventes, siendo utilizado para aparatos domésticos y eléctricos, así como botellas y frascos (Hermida, 2011). Este polímero está en función de una columna vertebral que se compone de

átomos de carbono con grupos fenilo unidos a la mitad de los átomos de carbono (Figura 10).

Figura 10. Estructura de la cadena molecular del PS.



Fuente: <https://www.pslc.ws/spanish/styrene.htm>

El poliestireno puro es rígido, transparente, razonablemente fuerte, quebradizo, químicamente inerte y un buen aislante eléctrico. Tiene una densidad de 1 gr/cm³. Se puede convertir fácilmente en artículos útiles mediante extrusión, moldeo por inyección, moldeo por soplado y termoformado. En su estado espumado es un excelente aislante térmico, que se puede formar en láminas, tubos y formas más complejas. El poliestireno se puede modificar químicamente injertándolo en polímeros gomosos, lo que aumenta considerablemente su dureza. Estas características, junto con su costo relativamente bajo, garantizan que el poliestireno encuentre uso en una amplia gama de aplicaciones (Andrew & Allison, 2006).

2.2.4. Ventajas de los plásticos.

El plástico vino a revolucionar el mundo de la industria al ofrecer materiales con propiedades beneficiosas, la cuales se describen a continuación (Beltrán, 2020, como se citó en Siddique, 2008):

- Versatilidad extrema y una muy buena capacidad de adaptarse para satisfacer necesidades técnicas.
- Mayor ligereza ante los demás materiales del mercado, reduciendo el consumo en fletes.
- Buenas propiedades de seguridad y higiene para el envasado de alimentos.

- Durabilidad y longevidad.
- Resistencia ante químicos, agua e impacto.
- Buenas propiedades de aislamiento térmico y eléctrico.
- Elaboración económica.
- Capacidad de adherencia con otros materiales (papel de aluminio, papel, adhesivos).
- Estéticamente bien visto.
- Elegido como material para estilos de vida humana.
- Funciones inteligentes – materiales y sistemas.

Estas ventajas han permitido que estos materiales poliméricos tengan aplicaciones en objetos y productos importantes y necesarios para la industria, entre las cuales se destacan las siguientes (Tabla 6).

Tabla 6. Aplicaciones de los plásticos.

Nombre	Usos comunes del material virgen	Productos reciclados
Politereftalato de etileno (PET)	Botellas de gaseosas, envases de aderezos.	Botellas, fibras para polars, pelotas de tenis, películas.
Polietileno de alta densidad (HDPE)	Envases para jugos, lácteos, juguetes, bolsas.	Bases de botellas, macetas, butacas, cestos, juguetes.
Policloruro de vinilo (PVC)	Envases para artículos de limpieza y alimentos.	Tapetes, mangueras, caños, guardabarros.
Polietileno de baja densidad (LDPE)	Bolsas para pan o para freezer.	Bolsas de residuos.
Polipropileno (PP)	Envases para alimentos, medicamentos.	Cubeteras, bandejas para alimentos, partes de baterías.

Poliestireno (PS)	Cajas de CD, vasos, cubiertos, bandejas para canes.	Accesorios de escritorio, macetas, cestos, bandejas.
-------------------	---	--

Fuente: Hermida (2014).

A pesar de tener diversas aplicaciones, los plásticos suelen tener solo un primer uso principal y posteriormente terminan desechándose. Por lo tanto, en la mayoría de los casos, lo que permite que un plástico tenga un segundo o más usos es por la ejecución del reciclaje.

2.2.5. Desventajas de los plásticos.

A pesar de ofrecer numerosas bondades, los plásticos tienen ciertas desventajas que van ligadas con su excesiva presencia en el medio ambiente y los daños que generan a la salud. Entre estas desventajas se enlistan las siguientes:

- El uso de productos químicos con potencial dañino que se utilizan para su fabricación y que se agregan como estabilizantes o colorantes, generando riesgos ambientales y riesgos para la salud humana ([Siddique, 2008](#)).
- Su relación con el medio ambiente no es amigable, debido a que su tiempo de descomposición es bastante largo ([Siddique, 2008](#)). Esta descomposición ocasiona la generación de óxidos de azufre (SOx), óxidos de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles (COV).
- Una proporción considerable de productos y bienes fabricados con plástico generalmente se desechan poco después de su producción (por ejemplo, botellas de agua y refrescos de PET, envases de alimentos), lo que genera enormes cantidades de residuos plásticos posconsumo. La producción de este tipo de residuos seguirá aumentando en el futuro ([Correia et al., 2014](#)).

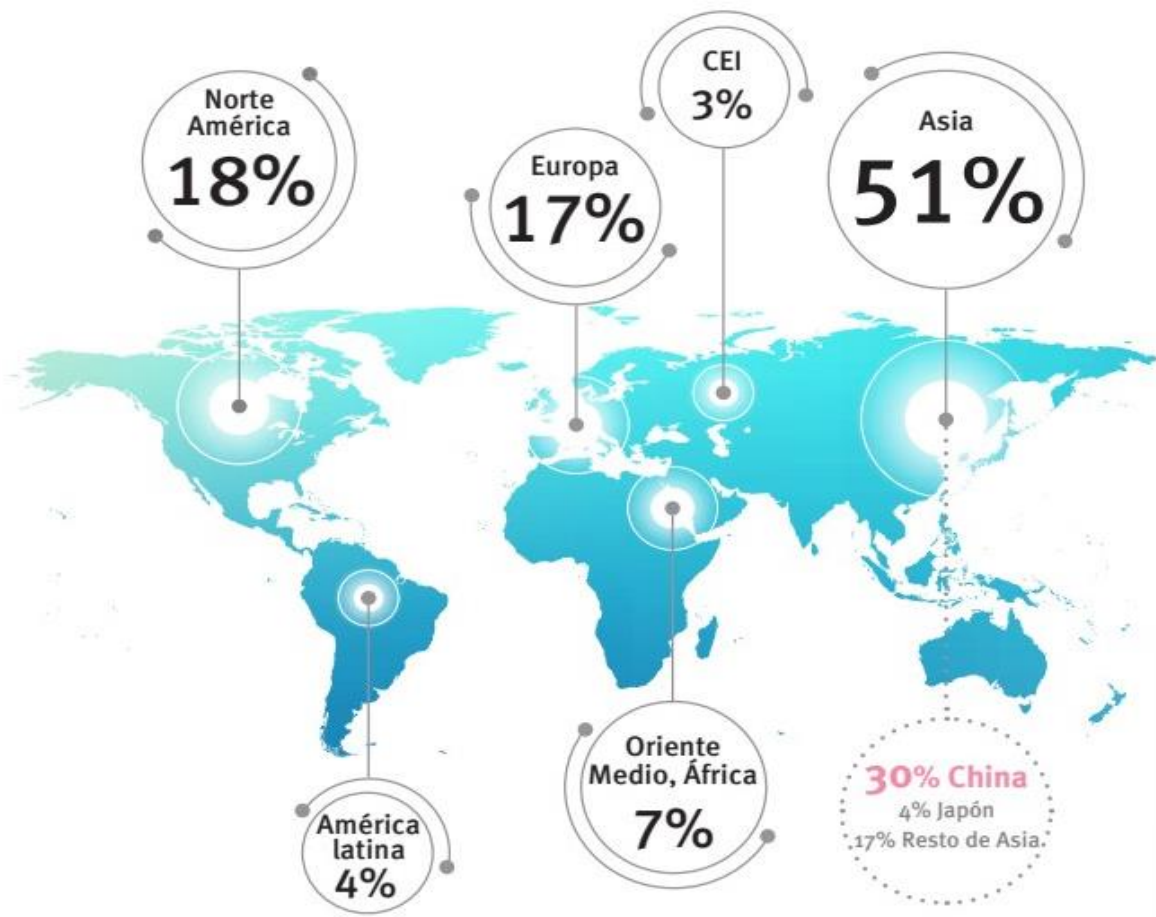
Los plásticos consumen anualmente, a nivel mundial, el 4% de la producción de petróleo, para su elaboración.

2.2.6. Datos estadísticos de producción y contaminación.

Los plásticos consumen anualmente, a nivel mundial, el 4% de la producción de petróleo, para su elaboración.

Desde su desarrollo en la década de 1930, el consumo de plásticos ha ido aumentando de manera constante y considerable. Entre 1950 y 2011, la producción mundial anual de plásticos aumentó de 1,7 a 280 millones de toneladas. Entre los diversos tipos de plásticos producidos, el PET es uno de los más relevantes, correspondiendo actualmente a alrededor del 7% de las cifras mencionadas, seguido de este plástico, continua el HDPE como la gama de plástico de mayor producción (de Brito et al., 2018). De hecho, se ha estimado que la producción anual de residuos plásticos se duplica cada 10 años (Correia et al., 2014).

Figura 11. Distribución de producción de plásticos a nivel mundial.



Fuente: Plastics Europe, 2019.

2.2.7. Tipos de reciclaje.

2.2.7.1. Mecánico.

El reciclado mecánico lleva varias etapas donde se realiza: la separación manual, el triturado en partículas, clasificación de partículas por aire, lavado, inmersión en agua y separación electrostática (Gaggino, 2008).

Es el más utilizado; contempla la preselección o separación de los residuos seguida de una molienda, lavado y peletizado; el material así obtenido se somete a un proceso de transformación que permita obtener la forma requerida. Así mismo, las escamas resultantes se pueden destinar en forma directa (sin necesidad de volver a hacer pellets) en la fabricación de productos por inyección o extrusión.

Dependiendo de la calidad del material resultante, el reciclado mecánico se conoce como primario o secundario: el primero consiste en la conversión de los plásticos de desecho en artículo con propiedades fisicoquímicas iguales o similares a las del material original y normalmente es el reprocesamiento in situ de productos que no cumplen con los estándares de calidad del propio fabricante (Ávila et al., 2015, como se citó en Martínez et al., 2015).

En el caso del reciclaje secundario, los plásticos provenientes de desechos (mezclados o solos) se transforman en productos nuevos, pero con una calidad inferior a la original; en este caso no se requiere de limpieza previa, por lo que en ocasiones son llamados plásticos contaminados.

2.2.7.2. Químico.

El reciclado químico deshace o depolimeriza el plástico, separándose las moléculas que lo componen, las cuales se emplean para fabricar otra vez plásticos. Dependiendo de su pureza, este material puede usarse incluso, para el envasado de alimentos (Gaggino, 2008).

Consiste en la despolimerización del plástico mediante reacciones químicas que producen la separación de los componentes básicos de la resina (monómeros) los cuales se emplean para la síntesis de nueva materia prima virgen. También incluye la degradación en etapas para obtener productos de menor masa molecular a través de

ruptura de cadenas y las mezclas reactivas de distintos polímeros con la formación in situ de copolímeros de bloque o injertos poliméricos. Actualmente a escala industrial, se aplican tecnologías específicas para distintos tipos de plásticos, sin embargo, resulta especialmente adecuado para poliésteres, poliamidas y poliuretanos (Ávila et al., 2015, como se citó en Pilat & Toselli, 2002).

2.2.7.3. Energético.

El reciclado energético consiste en incinerar el plástico para generar energía, lo cual tiene como inconveniente la contaminación atmosférica que produce (Gaggino, 2008).

Es el tratamiento térmico de los plásticos de desecho para obtener energía, la cual se emplea para llevar a cabo otros procesos. Se fundamenta en la eliminación de la mayor parte del volumen de los residuos mediante combustión, transformando los desechos en gases, cenizas y escorias. Existen tres tipos de tecnologías de este tipo en función de los requerimientos de aire: pirólisis (en ausencia de oxígeno con la subsecuente formación de mezclas complejas de productos sólidos, líquidos o gaseosos), hidrogenación (proceso pirolítico en una atmósfera de hidrógeno o monóxido de carbono) y gasificación (combustión parcial con aire limitado). De esta manera, el plástico se convierte en combustible proporcionando energía calorífica como tal o que puede emplearse para la generación de electricidad (Ávila et al., 2015, como se citó en Goodship, 2007).

2.3. Mezclas de concreto con plásticos.

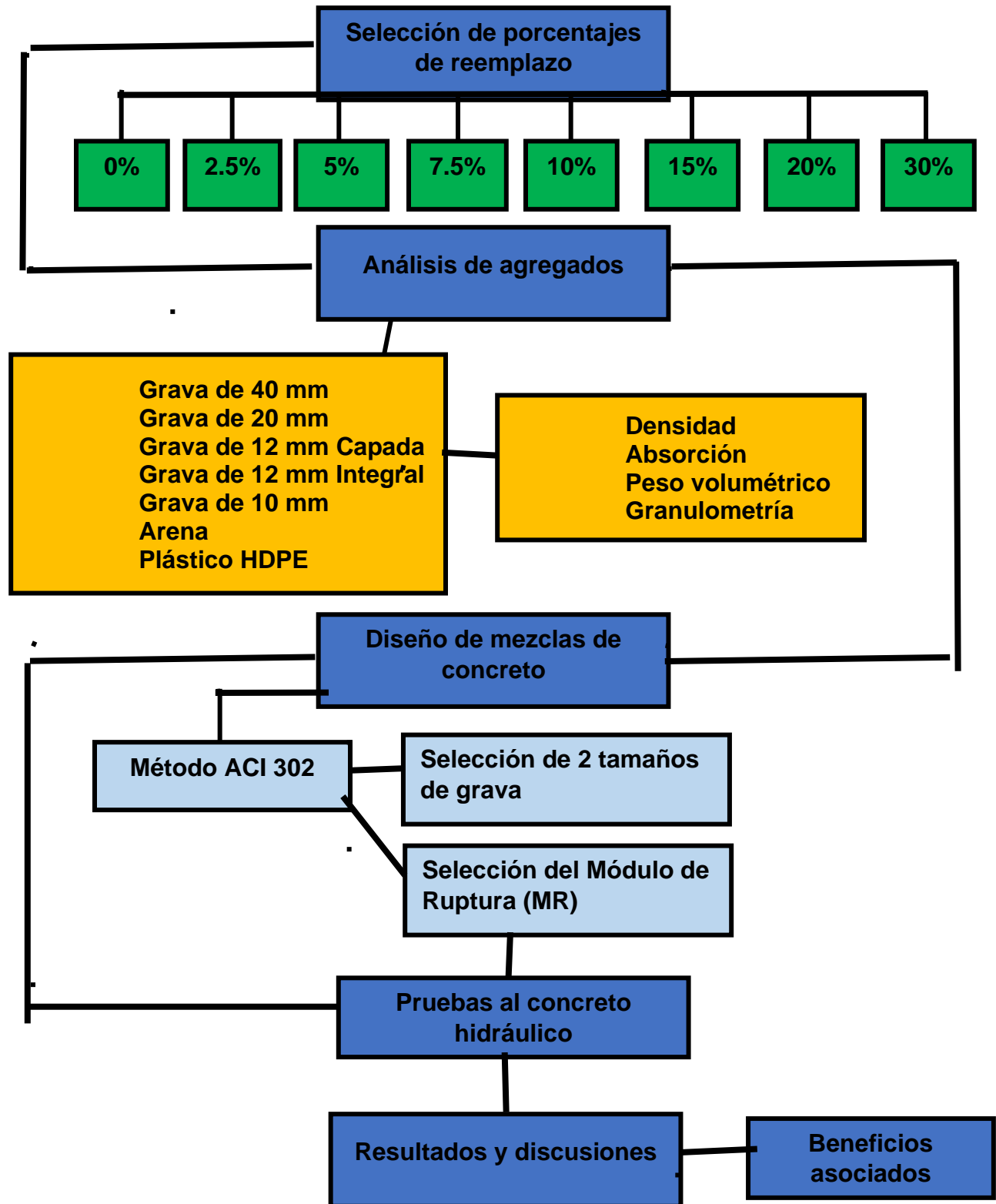
En los últimos años, ante la inminente presencia de residuos plásticos que se ha acumulado en el medio ambiente y teniendo en cuenta que estos residuos originalmente eran plásticos de un solo uso, su incorporación en mezclas de concreto ha resultado benéfico para utilizarse como aditivo de fibras o agregado plástico, con el concepto de considerarlos como materiales reutilizables con bajo contenido de carbono (Tamrin & Nurdiana, 2021). La literatura ha reportado que estas adiciones plásticas en el concreto permiten desarrollar elementos que sean livianos, resistentes a la exposición a la intemperie, impermeables, y así mismo, que también sean materiales que permitan ofrecer aislamiento térmico (Hermida, 2011; Bahij et al., 2020; Poonyakan et al., 2018). Estas propiedades han sido reportadas en publicaciones donde se destaca en su

mayoría el uso del PET en comparación del HDPE, siendo estos dos tipos de termoplásticos, los que los investigadores han desarrollado para un mejor rendimiento en las mezclas de concreto.

3. Metodología experimental.

A partir de este apartado se describen los métodos y procedimientos que se llevaron a cabo para poder dar cumplimiento a los objetivos planteados en esta investigación. En el siguiente diagrama se describe el desarrollo de la metodología a seguir (Figura 12).

Figura 12. Diagrama de la metodología experimental.



Fuente: Elaboración propia

3.1. Selección de porcentajes de reemplazo.

Para el desarrollo de esta investigación, el primer paso que se realizó fue una revisión de literatura para conocer las metodologías planteadas por otros autores, con el propósito de hacer énfasis en los porcentajes de reemplazo que seleccionaban para sus diseños de mezcla y elaboración de estas. Es importante determinar este parámetro de diseño debido a que nos guiará hacia su rango más conveniente a utilizar para tener la certeza de que porcentajes nos permiten obtener beneficios positivos e ir descartando aquellos que no tendrían aportación alguna a los resultados esperados. Así mismo, tener definido este parámetro contribuye a una mejor aproximación de la cantidad de materiales que se necesitan para la elaboración de las mezclas de concreto.

[Tamrin y Nurdiana \(2021\)](#) examinaron la incorporación de desechos plásticos de HDPE en mezclas de concreto, incorporando el plástico en función de la cantidad total de cemento del diseño original, sustituyendo cierto porcentaje de este insumo por su equivalente de HDPE, teniendo en cuenta porcentajes de reemplazo de 2.5%, 5%, 10% y 20% para partículas laminares de plástico de 0.5 mm de espesor con tamaños de 10 x 10 mm, 5 x 20 mm y 2.5 x 40 mm. Sus resultados obtenidos infieren en un decremento en el revenimiento y en la masa unitaria, sin embargo, en cuanto a su resistencia a la tensión y compresión, estas se asemejan debido a que en el porcentaje de reemplazo del 5% hay ganancias de estas propiedades, es decir, incrementan las resistencias, pero en el resto disminuyen, lo que permite deducir que ese porcentaje de reemplazo es el adecuado para obtener beneficios de la incorporación o sustitución de HDPE por algún insumo que componen las mezclas de concreto, en este caso, el cemento.

Otros autores reportan incrementos en sus resistencias a las compresión y tensión al incorporar fibras de plástico HDPE en las mezclas de concreto, con porcentajes de reemplazo de 0.40%, 0.75% y 1.25%, siendo estos parámetros, una pauta para indicar que en porcentajes pequeños, las propiedades en estado endurecido se ven beneficiadas ([Stana & Pešic, 2016](#)). Estos datos se pueden afirmar con los resultados obtenidos de [Punitha et al. \(2021\)](#), donde se menciona la selección de porcentajes de reemplazo con un rango del 5% al 30% (5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30%), los cuales sustituyen al agregado fino utilizado, teniendo un impacto en la resistencia a la flexión y

tracción que se ven disminuidas, rescatando al porcentaje del 5% como el que logra mantener condiciones similares a las de la mezcla de concreto original sin plástico.

En general, la literatura reporta que para porcentajes de reemplazo del 0% al 5% hay disminuciones en sus propiedades mecánicas, pero en un 10% \pm 5% las resistencias se pueden ver favorecidas, ya sea con mantener esta propiedad al igual que la mezcla de concreto original o que se incremente, determinando que a partir del 15% en adelante ya no hay ganancias, solo hay decrementos en cualquiera de sus propiedades, a excepción del contenido de aire que se comporta de manera inversa el añadir mayor cantidad de plástico a las mezclas de concreto. (Biswas, 2020; Galupino et al., 2019; Shanmugapriya & Santhi, 2017).

El llevar a cabo esta revisión de literatura, permitió definir los distintos porcentajes de reemplazo con los que se trabajaría más adelante en las mezclas de concreto a diseñar para la presente investigación, siendo estos porcentajes los siguientes: 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 15%, 20% y 30%. El rango seleccionado comprende del 0% al 30% a raíz de que la mayoría de las investigaciones similares utilizan porcentajes máximos del 20%, 25%, teniendo una mayor aproximación en porcentajes pequeños y en porcentajes más grandes una mayor separación, por lo tanto, con estos parámetros se busca obtener resultados similares o mejores a los que ya han sido reportados previamente.

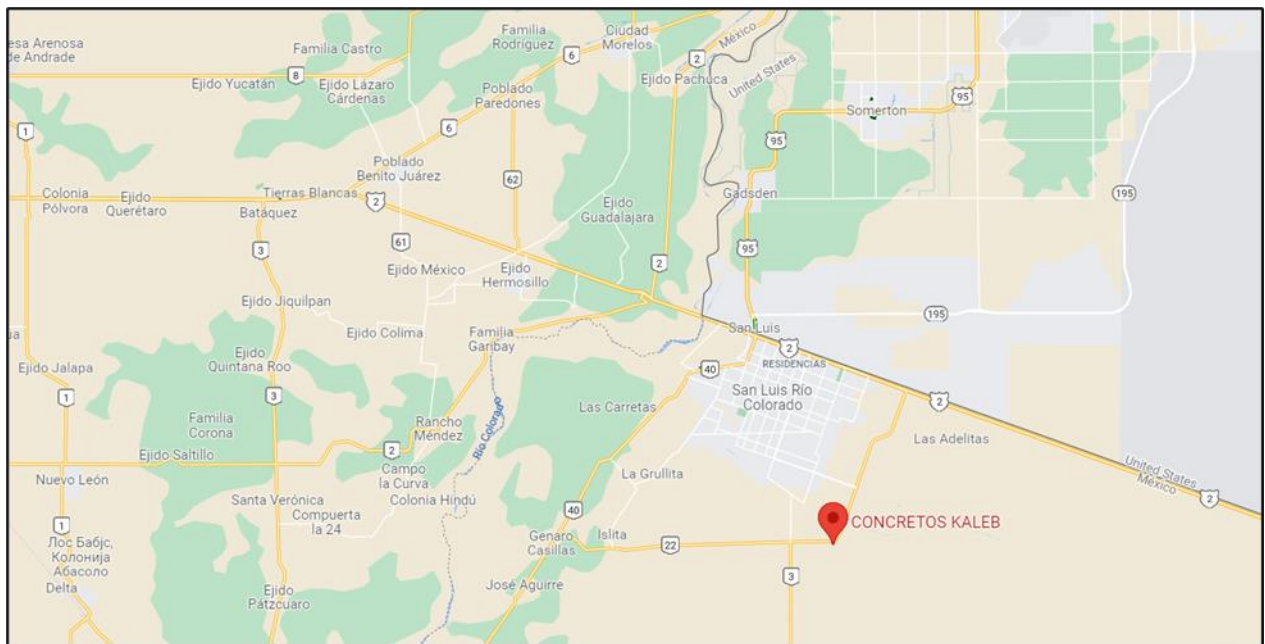
3.2. Análisis de agregados.

Este análisis se posiciona como el primer proceso de laboratorio a ejecutar y representa procedimientos, toma de decisiones de suma importancia para poder decidir que tamaños de grava utilizar, además de definir si sería necesario hacer una combinación de dos tamaños para un mejor acomodo en las mezclas de concreto, y así mismo poder proceder a diseñar las mezclas de concreto.

De acuerdo a la NMX-C-111-2014, los agregados son materiales de naturaleza pétreo que pueden proceder de minas, de bancos de extracción, de la trituración de elementos de concreto o también resultantes de un proceso industrial, que al ser mezclados con cementantes, permiten según el caso la elaboración de concretos y morteros.

Es pertinente mencionar que a partir de este subapartado de la metodología se recurrió a un laboratorio de control de calidad de una planta de concretos llamada Concretos Kaleb, la cual se ubica en el municipio de San Luis Río Colorado, Sonora, sobre el Libramiento Golfo de Santa Clara - Ejido La Islita (Figura 13).

Figura 13. Ubicación de Concretos Kaleb.



Fuente: Google maps.

La disponibilidad de agregados fue de diferentes tamaños (Figura 14 y 15), los cuales se enlistan en la siguiente tabla (Tabla 7):

Tabla 7. Tipos de agregados seleccionados.

TMA	Nomenclatura	Descripción	Banco de Agregados
1 ½" (40 mm)	GTMG37	Grava Triturada Minera Granítica de 37.50 mm	GUSA, Mexicali, Baja California

¾" (20 mm)	GTMG20CAP	Grava Triturada Minera Granítica de 20 mm Capada	GUSA, Mexicali, Baja California
¾" (20 mm)	GTMG20INT	Grava Triturada Minera Granítica de 20 mm Integral	GUSA, Mexicali, Baja California
½" (12 mm)	GSMG12	Grava Semitriturada Minera Granítica de 12 mm	GUSA, Mexicali, Baja California
3/8" (10 mm)	GSMG10	Grava Semitriturada Minera Granítica de 10 mm	GUSA, Mexicali, Baja California
Arena	AN	Arena Natural	CUCOS, Ejido Mérida, Baja California
Plástico HDPE	HDPE10	Polietileno de Alta Densidad	Universal Recycling Mexicali, Mexicali, Baja California

Fuente: Elaboración propia.

Figura 14. Ilustración de los agregados seleccionados.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

Figura 15. Ilustración del agregado plástico seleccionado.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

Estas muestras de agregados fueron extraídas de los almacenes de agregados de la planta de concretos, siendo previamente homogenizadas para obtener una muestra representativa. El hecho de seleccionar todos los agregados disponibles con los que la planta tiene a su disposición radica en hay que tratar de analizar el mayor conjunto posible de agregados para determinar cuales de ellos permitirán obtener un mejor acomodo en las mezclas de concreto, pero para ello hay que tener un punto de partida en el cual se consideraron los siguientes parámetros:

- Selección de Grava de 40 mm (1 1/2") como agregado grueso principal (grava primaria).
- Selección de un segundo tamaño de Grava que sea menor al agregado grueso principal seleccionado en caso de que este no cumpla con una granulometría favorable (grava secundaria).

La grava de 40 mm ha sido seleccionada por su papel que juega dentro del desempeño una mezcla de concreto, especialmente en elementos estructurales de grandes superficies sometidos a flexión, como pueden ser pisos industriales y losas para la capa de rodadura de pavimentos rígidos, utilizándose este tamaño de grava en proyectos, al menos a nivel regional, para la construcción de estos elementos estructurales en zonas o parques industriales y en infraestructura carretera (pavimentos rígidos). Tomando en cuenta esta última aplicación, estos agregados gruesos transportan cargas importantes y distribuyen la carga desde la superficie superior (capa de rodadura) a las capas inferiores subsiguientes ([Umashankar et al., 2022](#)).

Ahora bien, el tener definido un tamaño de grava que se desee o requiera utilizar no garantiza que sea óptimo aplicarlo directamente a una mezcla de concreto, debido a que se tiene que hacer un análisis de su granulometría y a partir de ahí tomar la decisión final si será ideal hacer solo el uso de un tamaño de agregado, o bien, de involucrar otro tamaño de agregado que le permita tener al contenido de grava de la mezcla un mejor acomodo en la misma, y además, la combinación de diferentes tamaños de agregados marcan el rumbo hacia el diseño de mezclas a utilizar.

En ocasiones el análisis de agregados se desprecia o se olvida debido a que los investigadores normalmente se centran en la calidad de la pasta de cemento para

calcular la resistencia del hormigón. Sin embargo, la resistencia del concreto no solo depende de la resistencia del producto hidratado y la porosidad de la pasta de cemento sino también de las propiedades de los agregados, los cuales pueden variar dependiendo de su naturaleza geológica (por ejemplo, piedra caliza, basalto, arenisca, granito) (de Brito et al., 2018; Silva & de Brito, 2015).

En la NMX-C-111-ONNCCE-2018 se especifican las propiedades y métodos de ensayo a aplicar para el análisis de agregados. Las propiedades analizadas en esta investigación se enlistan en la siguiente tabla con su respectiva normativa mexicana aplicada (Tabla 8).

Tabla 8. Pruebas a los agregados realizadas.

Prueba	Normativa aplicable
Granulometría	NMX-C-077-1997-ONNCCE
Densidad y Absorción	NMX-C-164-ONNCCE-2014
	NMX-C-165-ONNCCE-2014
Peso volumétrico	NMX-C-073-ONNCCE-2004

Fuente: Elaboración propia.

Aplicar esta serie de pruebas permitirá tener un mayor control de la calidad de los agregados, por lo que debe considerarse un factor principal en la estimación de la resistencia a la compresión para mezclas de concreto de baja y alta resistencia (de Brito et al., 2018).

3.2.1. Granulometría.

La granulometría es la distribución del tamaño de las partículas de un agregado, que se determina a través del análisis de los tamices (cedazos, cribas, mallas). En la NMX-C-077-1997-ONNCCE se establece el método para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos, con el fin de determinar la distribución de las partículas de diferentes tamaños por medio de cribas, además, esta normativa indica los límites máximos y mínimos del porcentaje acumulado que pasa el material en cada tamiz.

Para poder ejecutar esta prueba se realizó el muestreo correspondiente de cada uno de los agregados analizados (Figura 16).

Figura 16. Muestreo de los agregados.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

3.2.1.1. Grava primaria.

Los resultados reportados de este ensayo se describen a continuación (Tabla 9).

Tabla 9. Granulometría del agregado grueso de 40 mm.

Malla No.	GTMG40		Límites granulométricos de acuerdo a NMX-C-077	
	Peso retenido (gr)	% Pasa acumulado	% Mínimo	% Máximo
2"	0	100.00	100	100
1 1/2"	0	100.00	90	100
1"	3105.6	61.14	20	55
3/4"	2554.4	29.17	0	15

1/2"	1360.4	12.15	---	---
3/8"	695	3.45	0	5
No. 4	251	0.31	---	---
No. 8	8	0.21	---	---
No. 16	0	0.21	---	---
No. 30	0	0.21	---	---
No. 50	0	0.21	---	---
No. 100	0	0.21	---	---
No. 200	0	0.21	---	---
Ch.	17	0.00	---	---
Total	7991.4	---	---	---

Fuente: Elaboración propia.

El ensaye granulométrico realizado a la grava de 40 mm, indica que en algunos porcentajes del material que pasa acumulado ha sido mayor respecto a los límites establecidos, por lo tanto, esto permite identificar que este agregado grueso tiene una mayor cantidad de material fino o que es de menor tamaño respecto al tamaño que debería tener mayor presencia en el total de la muestra analizada (Figura 17 y 18).

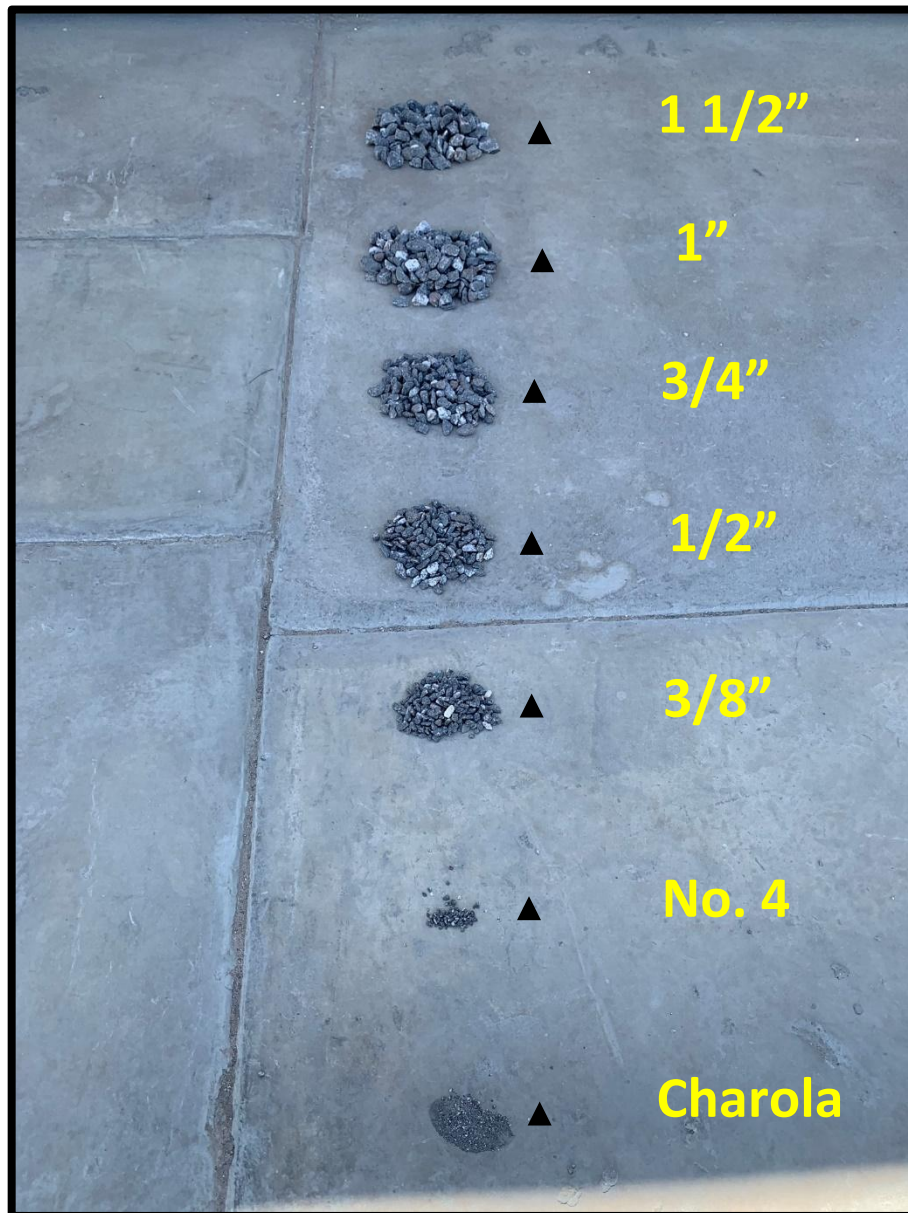
Figura 17. Proceso de cribado de la grava de 40 mm.



a) Cribado de la grava de 40 mm, b) Pesado de la grava de 40 mm retenida

Fuente: Tomada por Soriano (2021).

Figura 18. Ilustración de la distribución granulométrica de la grava de 40 mm.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

Si bien es cierto que los agregados no siempre cumplen con los parámetros normativos en sus análisis granulométricos, es conveniente hacer ajustes en sus graduaciones de tamaños, y en este caso, una de las opciones planteadas fue analizar la granulometría de las demás muestras de material que se tuvieron al alcance para determinar cuál de ellas se ajusta a la grava de 40 mm, es decir, cual otro tamaño de grava disponible

cumple con los límites granulométricos o permite ajustar al contenido total de grava de la mezcla empleando el método de diseño que se menciona más adelante.

3.2.1.2. Grava secundaria

El resto de los resultados de los ensayos granulométricos para elegir el segundo tipo de grava se pueden apreciar en las siguientes tablas (Tabla 10, 11, 12 y 13).

Tabla 10. Granulometría del agregado grueso de 20 mm (capado).

Malla No.	GTMG20CAP		Límites granulométricos de acuerdo a NMX-C-077	
	Peso retenido (gr)	% Pasa acumulado	% Mínimo	% Máximo
2"	0.0	100.0	---	---
1 1/2"	0.0	100.0	---	---
1"	43.8	99.5	100	100
3/4"	2633.6	66.4	90	100
1/2"	3681.4	20.2	---	---
3/8"	1090.8	6.5	20	55
No. 4	441.6	1.0	0	10
No. 8	23.0	0.7	0	5
No. 16	0.0	0.7	---	---
No. 30	0.0	0.7	---	---
No. 50	0.0	0.7	---	---
No. 100	0.0	0.7	---	---
No. 200	0.0	0.7	---	---
Ch.	55.6	0.0	---	---
Total	7969.8	---	---	---

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Granulometría del agregado grueso de 20 mm (integral).

Malla No.	GTMG20INT		Límites granulométricos de acuerdo a NMX-C-077	
	Peso retenido (gr)	% Pasa acumulado	% Mínimo	% Máximo
2"	0.0	100.0	---	---
1 1/2"	0.0	100.0	---	---
1"	0.0	100.0	100	100
3/4"	647.8	91.9	90	100
1/2"	2522.4	60.3	---	---
3/8"	3492.0	16.6	20	55
No. 4	1245.0	1.0	0	10
No. 8	26.0	0.7	0	5
No. 16	0.0	0.7	---	---
No. 30	0.0	0.7	---	---
No. 50	0.0	0.7	---	---
No. 100	0.0	0.7	---	---
No. 200	0.0	0.7	---	---
Ch.	54.2	0.0	---	---
Total	7987.4	---	---	---

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Granulometría del agregado grueso de 13 mm.

Malla No.	GTMG13		Límites granulométricos de acuerdo a NMX-C-077	
	Peso retenido (gr)	% Pasa acumulado	% Mínimo	% Máximo
2"	0.0	100.0	---	---
1 1/2"	0.0	100.0	---	---
1"	0.0	100.0	---	---
3/4"	0.0	91.9	100	100
1/2"	113.6	60.3	90	100

3/8"	1789.8	16.6	40	70
No. 4	1464.0	1.0	0	15
No. 8	183.2	0.7	0	5
No. 16	0.0	0.7	---	---
No. 30	0.0	0.7	---	---
No. 50	0.0	0.7	---	---
No. 100	0.0	0.7	---	---
No. 200	0.0	0.7	---	---
Ch.	426.0	0.0	---	---
Total	3976.6	---	---	---

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Granulometría del agregado grueso de 10 mm.

Malla No.	GTMG10		Límites granulométricos de acuerdo a NMX-C-077	
	Peso retenido (gr)	% Pasa acumulado	% Mínimo	% Máximo
2"	0.0	100.0	---	---
1 1/2"	0.0	100.0	---	---
1"	0.0	100.0	---	---
3/4"	0.0	100.0	---	---
1/2"	0.0	100.0	100	100
3/8"	43.6	97.8	85	100
No. 4	1720.4	11.6	10	30
No. 8	129.4	5.1	0	10
No. 16	0.0	5.1	0	5
No. 30	0.0	5.1	---	---
No. 50	0.0	5.1	---	---
No. 100	0.0	5.1	---	---
No. 200	0.0	5.1	---	---
Ch.	102.6	0.0	---	---

Total	1996.0	---	---	---
--------------	--------	-----	-----	-----

Fuente: Elaboración propia.

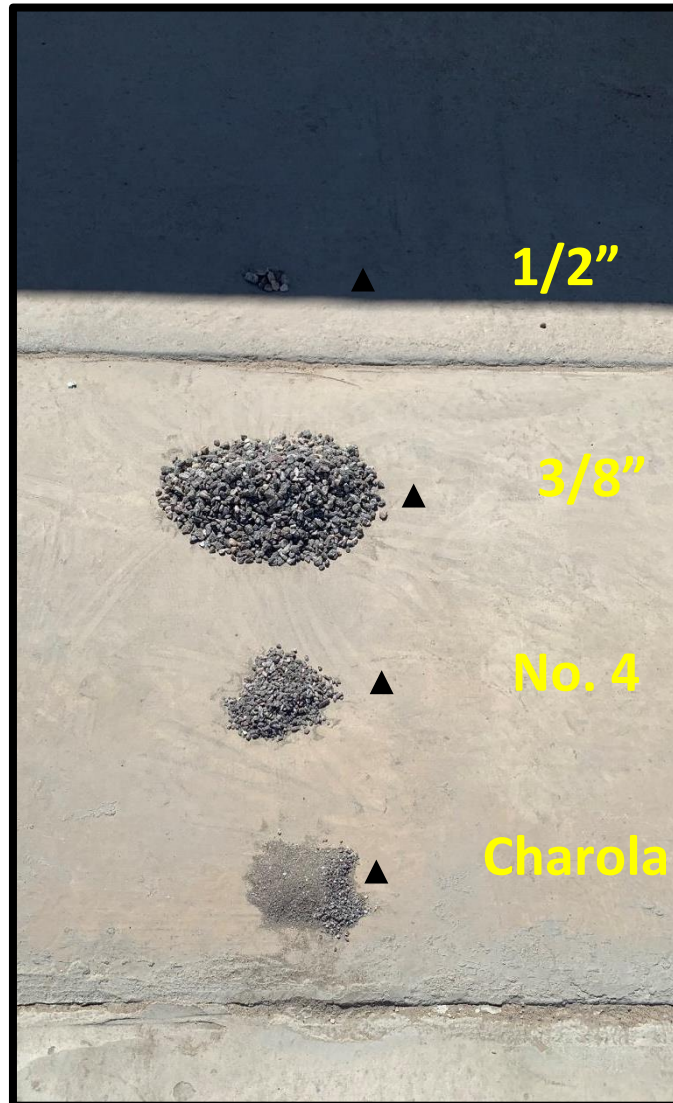
Al analizar y comparar las granulometrías de estos diferentes tamaños y tipos de agregados, se percató que la grava de 10 mm cumple prácticamente en todas sus graduaciones, encontrándose el porcentaje que pasa acumulado dentro de los límites mínimos y máximos permitidos por la normativa mexicana correspondiente (Figura). Esta grava es conocida como “sello”, la cual es utilizada para el riego de sello de los pavimentos flexibles (asfálticos) y también para el diseño de mezclas de concreto hidráulico, como se presenta en esta investigación (Figura 19 y 20).

Figura 19. Pesado de la grava retenida de 10 mm.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

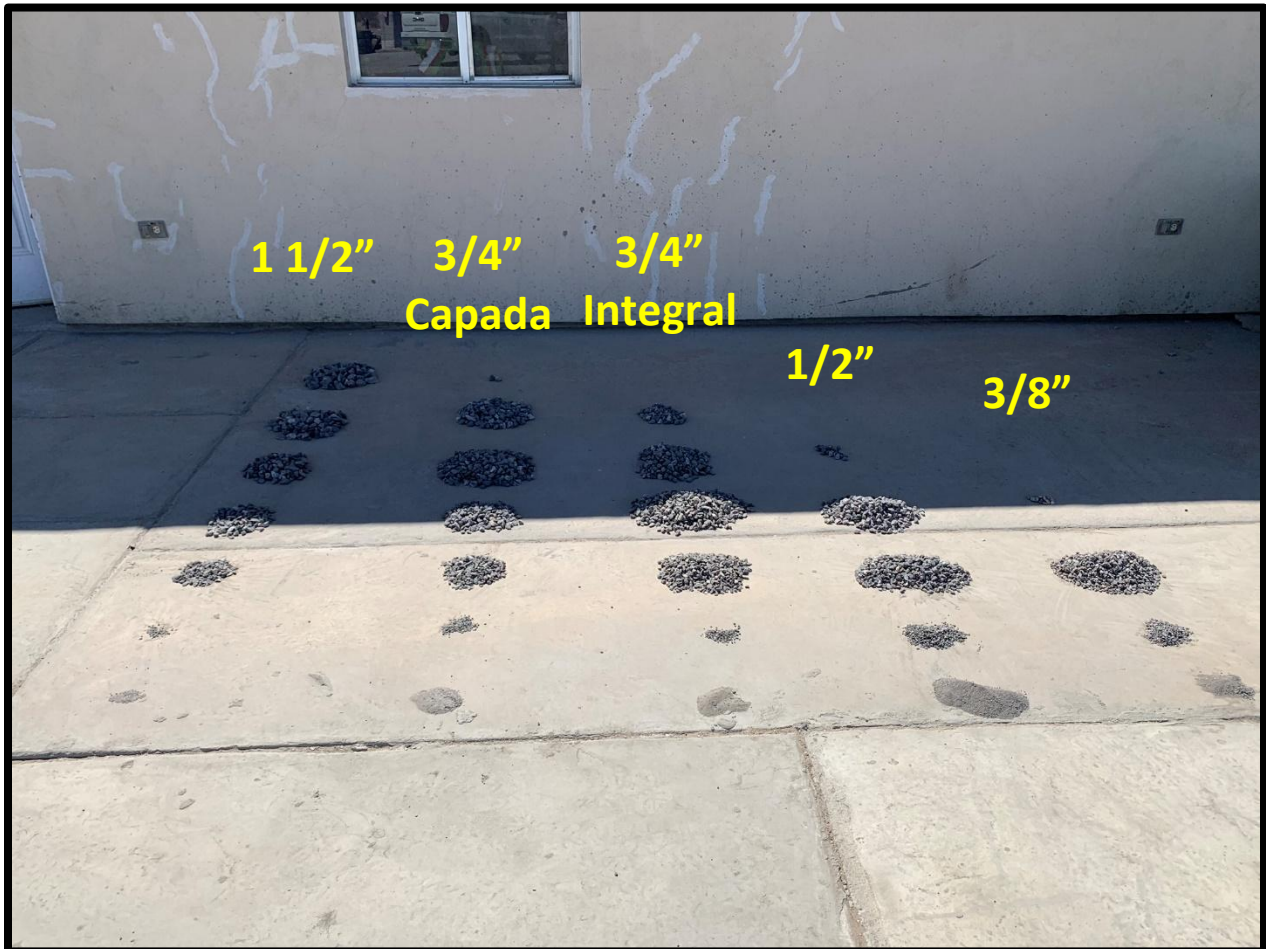
Figura 20. Ilustración de la distribución granulométrica de la grava de 10 mm.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

La combinación del agregado grueso primario (grava de 40 mm) y el agregado grueso secundario (grava de 10 mm) permite que aquellos vacíos que generaba la falta de tamaños de graduaciones que se encontraban fuera de los límites por parte de la grava principal, sean cubiertos por el buen acomodo y buena granulometría de la segunda grava seleccionada (Figura 21). Esto se podrá apreciar en los siguientes subapartados de la metodología empleada, cuando se mencione y describa el método de diseño utilizado.

Figura 21. Ilustración de la distribución granulométrica de los agregados analizados.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

Si bien, el agregado grueso es fundamental para la elaboración de una mezcla de concreto, el agregado fino juega un papel indispensable, ya que la arena en combinación con el agua y el cemento, generan lo que se conoce como “lechada” o pasta de cemento, la cual permite que exista la adherencia de cada insumo de la mezcla y que a su vez le da trabajabilidad al producto final al momento de su colocación. Pero antes, se tiene que conocer su granulometría para determinar si el material fino a utilizar es una arena fina o gruesa y posteriormente definir el contenido de arena ideal dentro del diseño de mezclas a ejecutar.

3.2.1.3. Arena.

El ensayo granulométrico del agregado fino seleccionado se describe en la siguiente tabla (Tabla 14).

Tabla 14. Granulometría del agregado fino.

Malla No.	AN		Límites granulométricos de acuerdo a NMX-C-077	
	Peso retenido (gr)	% Pasa acumulado	% Mínimo	% Máximo
2"	0.0	100.0	---	---
1 1/2"	0.0	100.0	---	---
1"	0.0	100.0	---	---
3/4"	0.0	100.0	---	---
1/2"	0.0	100.0	---	---
3/8"	0.0	100.0	100	100
No. 4	5.4	98.9	95	100
No. 8	13.2	96.3	80	100
No. 16	31.8	89.8	50	85
No. 30	65.4	76.7	25	60
No. 50	184.6	39.5	10	30
No. 100	126.0	14.1	2	10
No. 200	63.4	1.3	---	---
Ch.	6.4	0.0	---	---
Total	496.2	---	---	---

Fuente: Elaboración propia.

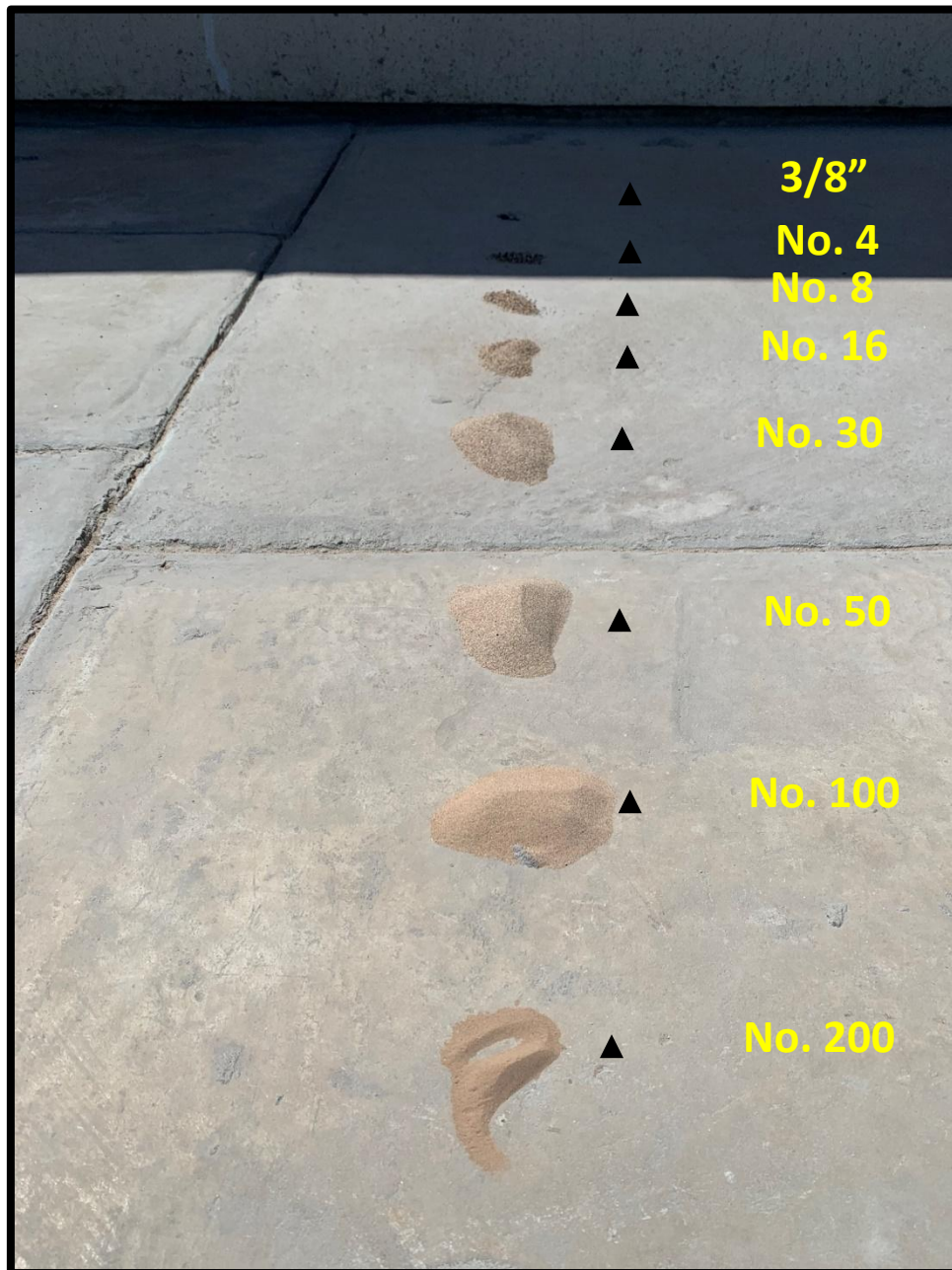
Al analizar esta propiedad de la arena, se puede deducir que el material tiene una ligera presencia de agregado grueso de 10 mm (3/8"), pero del otro lado, en la mayoría del resto de las mallas, hubo una mayor cantidad de material que no fue retenido, lo que indica que este material tiene un módulo de finura bajo, y provocará que la mezcla de concreto requiera una mayor cantidad de agua a la calculada en el diseño (Figura 22 y 23).

Figura 22. Pesado del agregado fino retenido de 1.19 mm.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

Figura 23. Ilustración de la distribución granulométrica del agregado fino analizado.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

Sin embargo, es recomendable ejecutar ensayos de densidad y absorción tanto al agregado fino como al agregado grueso, para tener la certeza del tipo de material que estamos ingresando al método de diseño y definir una relación de grava/arena óptima.

3.2.1.4. Plástico HDPE.

Se realizó también el ensaye granulométrico al insumo principal de las mezclas de concreto de esta investigación para determinar su tamaño máximo nominal (TMN) debido a que era un dato que se desconocía, ya que del sitio donde se produce y se consiguió no se contaba con dicha información (Figura 24).

Figura 24. Proceso de cribado del plástico HDPE.



a) Muestreo, b) Cribado del plástico HDPE y c) plástico HDPE retenido.

Fuente: Tomada por Soriano (2021).

El resultado de su composición granulométrica se describe a continuación (Tabla 15).

Tabla 15. Granulometría del plástico HDPE.

Malla No.	HDPE10		Límites granulométricos de acuerdo a NMX-C-077	
	Peso retenido (gr)	% Pasa acumulado	% Mínimo	% Máximo
2"	0.0	100.0	---	---
1 1/2"	0.0	100.0	---	---
1"	0.0	100.0	---	---
3/4"	0.0	100.0	---	---

1/2"	19.0	99.8	100	100
3/8"	211.6	97.1	85	100
No. 4	6190.0	19.6	10	30
No. 8	1177.6	4.8	0	10
No. 16	0.0	4.8	0	5
No. 30	0.0	4.8	---	---
No. 50	0.0	4.8	---	---
No. 100	0.0	4.8	---	---
No. 200	0.0	4.8	---	---
Ch.	386.0	0.0	---	---
Total	7984.2	---	---	---

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de este ensaye demuestra que el tamaño con mayor presencia dentro de la muestra tomada de plástico HDPE es de 10 mm (3/8"), añadiendo que, en sus diversos tamaños, todos cumplen con los límites granulométricos, demostrando que al momento de incorporarse o sustituir algún agregado natural de manera parcial, el acomodo del material dentro de la mezcla no será problema alguno, al menos en cuanto a esta propiedad física que se refiere a su TMN (Figura 25 y 26).

Figura 25. Pesado del plástico HDPE retenido de 10 mm.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

Figura 26. Ilustración de la distribución granulométrica del plástico HDPE.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

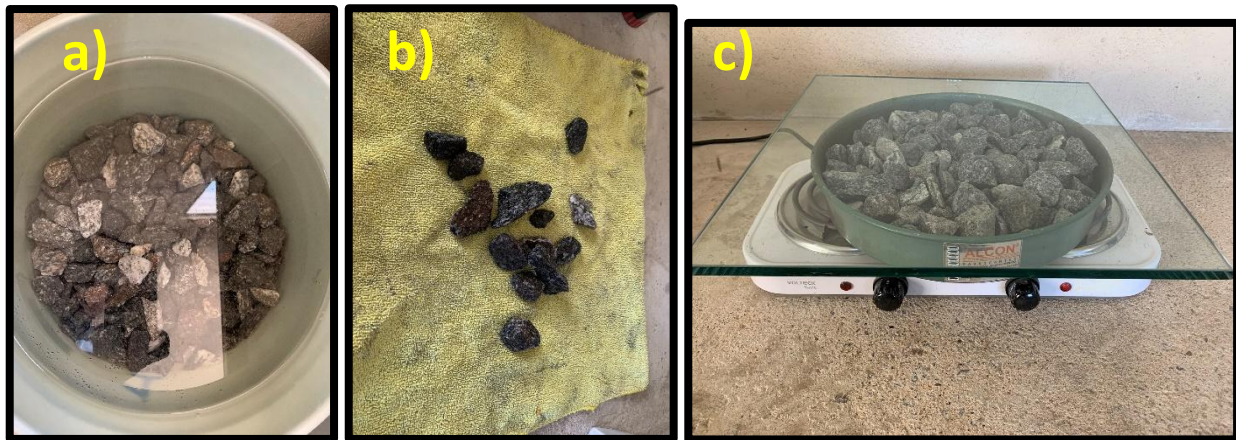
3.2.2. Densidad.

La NMX-C-164-ONNCCE-2014 define a esta propiedad de los agregados como la relación de la densidad del agregado saturado y superficialmente seco a la densidad del agua, equivalente a la relación de la masa del agregado saturado superficialmente seco a la masa del volumen del agua desalojada, considerando la masa de las partículas saturadas de agua y superficialmente secas y la masa de las partículas de agua que se incluyen en los poros que se encuentran dentro de las mismas (Figura 27).

En otras palabras, es la relación entre la masa del agregado y la masa de agua con el mismo volumen absoluto (Kosmatka, 2004). Se utiliza en ciertos cálculos para el proporcionamiento y el control de la mezcla, siendo un parámetro de diseño que indica

el volumen ocupado por el agregado en los métodos de volumen absoluto de diseños de mezclas.

Figura 27. Preparación de la grava de 40 mm para determinación de su densidad.



a) Saturación del agregado grueso, b) Secado del material y c) Material en estado Saturado Superficialmente Seco (S.S.S.)

Fuente: Tomada por Soriano (2021).

Figura 28. Determinación de la densidad del agregado grueso de 40 mm.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

La densidad del agregado fino se ejecutó mediante el procedimiento normativo correspondiente, preparando la muestra en estado S.S.S. (Figura 29).

Figura 29. Preparación del agregado fino en estado S.S.S.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

En la Tabla 16 se muestran los valores obtenidos de esta propiedad de los agregados analizados.

Tabla 16. Densidades de los agregados.

Material	Densidad (gr/cm ³)	Límites de acuerdo con NMX-C-164	
		Mínimo	Máximo
GTMG40	2.710	2.4	2.9
GTMG20CAP	2.727	2.4	2.9
GTMG20INT	2.703	2.4	2.9
GSMG13	2.685	2.4	2.9
GSMG10	2.685	2.4	2.9
AN	2.612	2.4	2.9

HDPE10

1.075

0.94**

0.97**

**Nota: Andrew & Allison (2006) registran estas densidades aproximadas del HDPE.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con lo descrito en estos resultados, todas las densidades de los agregados se encuentran dentro del rango de aceptación permitido, a excepción del plástico HDPE que ligeramente se excede del límite máximo, pero con una significancia que no altera realmente el desempeño de una mezcla de concreto. Es importante resaltar la forma en que se determinó esta propiedad física del agregado plástico, ya que por las limitaciones y alcances que se tuvieron a nivel laboratorio, este resultado de su densidad se obtuvo aplicando el mismo método de ensayo que se aplica para los agregados gruesos (Figura 30).

Figura 30. Determinación de la densidad del plástico HDPE como agregado grueso.



- a) Preparación del material y equipo, b) Vaciado del plástico HDPE al picnómetro y
c) Cantidad de agua desplazada en probetas.

Fuente: Tomada por Soriano (2021).

Un aspecto importante que señalar es si el agregado plástico seleccionado se está considerando como agregado grueso o fino, esto con la finalidad de poder terminar cual

picnómetro y por consecuencia, cual ensaye es el idóneo para determinar esta propiedad física de la densidad.

En el caso de esta investigación experimental, se ha propuesto realizar y se ha ejecutado la determinación de la densidad mediante el ensaye para agregado fino (Figura 31) (NMX-C-165-ONNCCE-2014).

Figura 31. Determinación de la densidad del plástico HDPE como agregado fino.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Cálculo de la densidad del plástico HDPE como agregado fino.

Plástico HDPE				
C (gr)	M (gr)	E (gr)	Volumen total (cm ³)	Densidad (gr/cm ³)
1692.40	960.00	1660.00	992.40	0.967

C = Masa del picnómetro lleno de agua.

M = Masa de la muestra usada.

E = Masa del picnómetro con la muestra y lleno de agua hasta su nivel de aforo.

Volumen total = C + M – E

Densidad = M / Volumen total

Fuente: Elaboración propia.

Es relevante poder hacer este cálculo por la densidad que se ha obtenido. Al comparar este resultado con el de otros autores (Tabla 17) se puede observar que, mediante este método de ensaye referente a agregados finos, la densidad si se puede encontrar dentro de los límites máximos y mínimos ([Andrew & Allison, 2006](#); [Bahadur & Sastry, 2005](#)). Tener este control de los valores de las densidades del agregado plástico permitirá que las mezclas de concreto no presenten una posible segregación, porque como se puede apreciar en la Figura, al momento de realizar el ensaye, las partículas de plástico HDPE terminan elevándose o flotando hasta la parte superior del picnómetro y por lo tanto, esto pudiera simular la manera en que se comportaría al momento de entrar en contacto con el resto de los insumos de las mezclas de concreto (Figura 32).

Figura 32. Efecto de flotación del plástico HDPE en agua.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

Este tipo de resultado en lo que refiere a la densidad del plástico HDPE, conllevó a plantear otra alternativa de análisis de materiales, es decir, se planteó y se llevó a cabo la determinación de la densidad de la arena en conjunto con el agregado plástico, considerando que este insumo será el que sustituirá al agregado fino en ciertas cantidades determinadas en el diseño (Figura 33). Realizar este tipo de ensayos y análisis de combinación de agregado fino o grueso con el agregado plástico, permitirán tener una mayor certeza del porcentaje densidad que podría aumentar al combinar agregado natural con agregado plástico, siendo esto un ensaye que permite ver a mayor escala la forma real en que estaría trabajando el plástico con la grava y en este caso, la arena (Tabla 18).

Figura 33. Determinación de la densidad de la arena con plástico HDPE.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

La densidad obtenida del agregado fino y plástico combinado se describe de la siguiente manera (Tabla 18).

Tabla 18. Cálculo de la densidad de la arena con plástico HDPE.

Arena - Plástico HDPE

C (gr)	M (gr)	E (gr)	Volumen total (cm ³)	Densidad (gr/cm ³)
1692.40	773.40	2040.00	425.80	1.816

C = Masa del picnómetro lleno de agua.

M = Masa de la muestra usada.

E = Masa del picnómetro con la muestra y lleno de agua hasta su nivel de aforo.

Volumen total = C + M – E

Densidad = M / Volumen total

Fuente: Elaboración propia.

La Figura deja en evidencia que del conjunto de agregados a utilizar (agregados naturales y plásticos), el plástico HDPE será el insumo que trate de empujarse hacia la superficie al momento de elaborar especímenes cilíndricos o vigas prismáticas de concreto (Figura 34). Pero su valor de densidad abre la posibilidad que haya una cierta resistencia a la flotación del agregado plástico.

Figura 34. Efecto de flotación del plástico HDPE con arena en agua.



a) Plástico HDPE asentado en la arena y b) Plástico HDPE flotando.

Fuente: Tomada por Soriano (2021).

Como se puede apreciar, inicialmente el plástico HDPE tiende a resistirse a flotar por entrar en contacto con la arena mediante el proceso de homogenización previo, es decir, antes de vaciar el agregado fino y plástico en el picnómetro, se homogenizó y posteriormente se fue depositando el total de esta muestra, pero como dentro de este ensaye se realiza una agitación del equipo una vez que se encuentre lleno hasta su nivel de aforo, esto ocasionó que el plástico terminara flotando. Esto se puede plantear dentro de dos pasos: a) colocación del material, b) vibrado del material.

Aunque en este ensaye solo consiste en análisis de agregados finos, y en este caso, en agregados plásticos, se puede visualizar como se comportarían estos agregados dentro de una mezcla de concreto, por lo que en el paso a), al momento de colocar la mezcla en un elemento, el plástico se asentaría junto con la arena, pero como en el procedimiento constructivo se tienen que sacar los vacíos de la mezcla una vez colocada, en el paso b) del vibrado se puede simular al momento de agitar el picnómetro. Por lo tanto, los agregados plásticos pueden influir en los aspectos prácticos de la colocación del concreto, actuando como un resorte cuando el hormigón se compacta mediante vibración ([Babafemi et al., 2018](#)).

Sin embargo, aún no se menciona el impacto que podría tener el cemento cuando se elaboren las mezclas de concreto, debido a que este material tiene también una densidad menor comparada con los agregados naturales y ligeramente mayor respecto a los agregados plásticos, pero esto se mencionará más adelante.

3.2.3. Absorción.

Es el incremento en la masa de un agregado seco cuando es sumergido en agua durante 24 h, a temperatura ambiente. Este aumento de masa tiene lugar debido al agua que se introduce en los poros del material y no incluye el agua adherida a la superficie de las partículas. Se expresa como por ciento de la masa seca, y es el índice de la porosidad del material.

Su determinación en los agregados gruesos y finos se describe en la NMX-C-165-ONNCCE-2014. Mediante este ensaye, se puede tener un mayor control del agua total del concreto requerida y la cantidad de los insumos de la mezcla se pueden determinar con mayor precisión. La condición o estado en la que se prepararon y tomaron los

agregados para ejecutar esta prueba fue la saturada superficialmente seca (S.S.S.), la cual es sumamente importante durante la determinación de la densidad, densidad relativa y por supuesto, la absorción. El termino S.S.S. es aquel donde los poros de cada partícula de agregado están llenos de agua, pero no hay exceso de agua en la superficie de las partículas, presentando un brillo acuoso, lo que denota de forma visual que los agregados se encuentran en tal condición, por lo tanto, esta condición no absorbe ni cede agua al concreto (Kosmatka, 2004).

Al ejecutar esta prueba en los agregados analizados, se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 19).

Tabla 19. Absorción de los agregados.

Material	Absorción (%)	Límites de acuerdo con NMX-C-165	
		Mínimo	Máximo
GTMG40	0.349	0.2	4.0
GTMG20CAP	0.402	0.2	4.0
GTMG20INT	0.503	0.2	4.0
GSMG13	0.614	0.2	4.0
GSMG10	0.786	0.2	4.0
AN	1.010	0.2	2.0
HDPE10	N/A	---	---

Fuente: Elaboración propia.

Los materiales analizados presentan porcentajes de absorción que se encuentran dentro de los límites de aceptación, siendo muy cercanos al límite mínimo en su mayoría. En el caso del plástico no se tienen límites establecidos debido a que varios autores tienden a despreciar esta propiedad por la poca o casi nula absorción que presentan (Abeyasinghe et al., 2021; Punitha et al., 2021). Al obtener esta propiedad física de los agregados seleccionados, se podrá ajustar y garantizar la cantidad total de agua requerida en el diseño de mezclas, para que estas puedan alcanzar la trabajabilidad o revenimiento deseado y esperado.

3.2.4. Peso volumétrico.

Esta propiedad de los agregados se define como la masa o el peso del agregado necesario para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado, donde dicho volumen es aquel ocupado por los agregados y los vacíos entre las partículas de agregado (Figura 35). Para la aplicación de este ensaye en los agregados analizados, se tuvo en cuenta que el peso volumétrico aproximada del agregado comúnmente usado en el concreto de peso normal tiene un rango de 1200 a 1750 kg/m³, valores de aceptación mencionados en la NMX-C-073-ONNCCE-2004. Un dato importante a tener en cuenta es que la cantidad de vacíos varía cerca del 30% a 45% para el agregado grueso y del 40% a 50% para el agregado fino (Kosmatka, 2004).

Figura 35. Ensayo de peso volumétrico de los agregados.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

En la siguiente tabla 20 se reportan los resultados correspondientes a los agregados analizados.

Tabla 20. Peso volumétrico de los agregados.

Material	Peso volumétrico (kg/m ³)	Límites de acuerdo con NMX-C-165	
		Mínimo	Máximo
GTMG40	1597	1200	1750
GTMG20CAP	1583	1200	1750
GTMG20INT	1558	1200	1750

GSMG13	1559	1200	1750
GSMG10	1580	1200	1750
AN	1760	1200	1750
HDPE10	530	**	**

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la tabla, se puede apreciar que los agregados gruesos se encuentran en un valor promedio de aceptación y el agregado fino tiene un peso volumétrico ligeramente mayor al esperado, traduciéndose este excedente como una presencia de arena gruesa dentro de la misma muestra de arena analizada. Por otra parte, el agregado plástico se presenta como un insumo que, al incorporarse a una mezcla de concreto, esta experimentará reducciones en su masa unitaria e incluso aumento de vacíos, siendo uno de los aspectos que tendrá que evaluarse dentro de las mezclas de concreto.

3.3. Diseño de mezclas de concreto hidráulico.

En este subapartado se describen los materiales seleccionados y el método utilizado para poder obtener las proporciones de los insumos de cada una de las mezclas de concreto propuestas.

3.3.1. Materiales.

3.3.1.1. Grava de 40 mm (GTMG40).

Esta grava se obtiene mediante procesos de trituración, de proveniencia minera y de tipo granítica, extraída de los bancos que se encuentran a las afueras de la ciudad de Mexicali, Baja California, que en este caso el sitio de explotación es del banco de agregados de GUSA, ubicado sobre la carretera a San Felipe en el km 36.

3.3.1.2. Grava de 10 mm (GSMG10).

Este agregado grueso se diferencia del agregado anterior por ser semitriturado. En cuanto al resto de sus características son las mismas que GTMG40.

3.3.1.3. Arena natural (AN).

Proveniente del banco de agregados llamado "CUCOS", con localización en el Ejido Mérida, en zona perteneciente al Valle de Mexicali.

3.3.1.4. Cemento.

Se utilizó Cemento Portland Compuesto con una clase resistente de 40 (CPC40), uno de los diferentes cementos que se producen en México (Tabla 21), con una clase resistente de 40 (Tabla 22). Este cemento fue extraído del Centro de Distribución (CEDIS) de Holcim Apasco de la ciudad de Mexicali, Baja California.

Tabla 21. Clasificación de cementos en México.

Tipo	Denominación
CPO	Cemento Pórtland Ordinario
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico
CPEG	Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno
CPC	Cemento Pórtland Compuesto
CPS	Cemento Pórtland con Humo de Sílice
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE-2017

Tabla 22. Clase de resistencia y especificaciones físicas.

Clase resistente	Resistencia a la compresión (N/mm²)		
	3 días mínimo	28 días mínimo	Máximo
20	-	20	40
30	-	30	50
30 R**	20	30	50
40	-	40	-
40 R**	30	40	-

**La letra R significa una resistencia a 3 días, conocida como resistencia rápida.

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE-2017

Es importante comprender que el cemento es un material inorgánico que es sometido a un proceso de pulverización sumamente fino y que además este material tiene la característica de fraguar y endurecer una vez que ha entrado en contacto con el agua,

incluso al adicionarse o mezclarse también con los agregados naturales, incluyendo otro tipo de agregados o materiales similares. Este material tiene un impacto en la adherencia los agregados con la pasta de cemento y por consecuencia en la resistencia del producto final que es el concreto, el cual en parte de su desempeño en estado fresco y endurecido depende de las propiedades químicas y físicas del material cementante (de Brito et al., 2018; Maruyama & Igarashi, 2014; Mechling et al., 2009).

Además, la elección de este insumo es importante para determinados proyectos o aplicaciones a las que estará destinada y expuesta nuestra mezcla de concreto (Tabla 23), porque conforme a las reacciones químicas que pueda presentar durante el proceso de hidratación y que termine en estado endurecido, el tipo de cemento será fundamental para conservar su resistencia y estabilidad, siendo estas las funciones que se mencionan en la NMX-C-414-ONNCCE-2017.

Tabla 23. Características especiales.

Simbología	Denominación
RS	Resistente a los Sulfatos
BRA	Baja Reactividad Álcali agregado
BCH	Bajo Calor de Hidratación
B	Blanco

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE-2017

En el caso de la mezcla de concreto a diseñar no se tomó en cuenta alguna característica especial, debido a que, en la región de Mexicali, Baja California no hay exposiciones severas para elementos de concreto, por lo tanto, el CPC40 es un cemento apto para este estudio.

3.3.1.5. Agua.

Se utilizó agua de la red de agua potable del municipio de San Luis Río Colorado, Sonora.

3.3.1.6. Aditivos.

Se seleccionaron 2 diferentes tipos de aditivos comerciales con base a la temperatura de exposición y las características de los agregados presentada.

- **Sika Plastiment 550 (P550).**

Este aditivo permite retardar el proceso de evaporización del agua, por lo que logra la reducción de agua, ya que logra que el agua calculada hidrate de manera eficiente a la mezcla de concreto sin necesidad de adicionar mayores cantidades de agua y por consecuencia, sin afectar o disminuir la resistencia del concreto. Para zonas donde perduran los climas cálidos, este aditivo es una opción viable para un diseño de mezclas de concreto.

- **Sika Viscoflow 8100.**

Su función está destinada en ofrecer un aditivo fluidificante de alto rango para una mejor trabajabilidad y permanencia en el revenimiento de la mezcla de concreto. En este caso, la elección de este aditivo se debe a la cantidad de finos (material que pasa la malla No. 4) que presenta la grava de 10 mm (GSMG10) seleccionada y previamente analizada, por lo que su presencia en el agregado grueso ocasionaría una mayor absorción de agua y como resultado mayor requerimiento de agua para que la mezcla de concreto alcance su trabajabilidad solicitada.

Estos aditivos también pueden favorecer la resistencia objetivo que requiere alcanzar un concreto cuando las condiciones ambientales y la naturaleza de los agregados no son las más favorables. A pesar de que en ocasiones, optar por aumentar el contenido de cemento puede ser una opción viable, más no económica, incorporar una cantidad específica de materiales cementantes suplementarios y disminuyendo el contenido de agua o introduciendo un superplastificante, pueden terminar siendo una de las opciones adecuadas y oportunas para un determinado diseño de mezclas ([de Brito et al., 2018](#)).

3.3.1.7. Plástico HDPE.

Este agregado plástico fue extraído de una recicladora denominada Universal Recycling Mexicali, ubicada sobre la Carretera a San Felipe en el km 3.5, en Mexicali, Baja California. Su proceso de trituración es por medios mecánicos y la forma de las partículas es obtenida a ser sometidas a fuerzas y presiones de extrusión. Las propiedades y características físicas no pudieron ser proporcionadas, por lo que se hicieron los análisis físicos que estuvieron al alcance, tal y como se describe en los apartados anteriores.

De forma general, este plástico presenta un TMN de 10 mm (3/8”) y una mayor presencia de forma cuadrada de sus partículas, las cuales poseen una textura superficial lisa en su totalidad.

3.3.2. Tipos de mezclas.

Antes de empezar a diseñar las mezclas de concreto, se definieron los diferentes tipos de mezclas que serán evaluadas en estado fresco y endurecido (Tabla 24) en función de su sustitución parcial de arena por plástico HDPE.

Tabla 24. Tipos de mezclas de concreto.

Mezcla	Porcentaje de reemplazo arena-plástico HDPE
M1	0%
M2	2.5%
M3	5.0%
M4	7.5%
M5	10.0%
M6	15.0%
M7	20.0%
M8	30.0%

Fuente: Elaboración propia.

Estos porcentajes de reemplazo se han sido seleccionado tomando como referencia el rango que ha sido más efectivo por varios autores ([Punitha et al., 2021](#); [Tamrin & Nurdiana, 2021](#)).

3.3.3. Método de diseño.

Se tomó como referencia de diseño la *Guía para la construcción de pisos y losas de concreto* del comité ACI 302R.

Esta guía tiene como propósito describir procedimientos y requerimientos para obtener losas de concreto que estén soportadas sobre el terreno y también para aplicarse en pisos de alta calidad para varias clases de servicios como es el caso de los pisos

industriales o losas de la capa de rodadura de los pavimentos rígidos. Además, se destacan aspectos de la construcción, tales como preparación del sitio, materiales para fabricar concreto, proporciones y mezclas, mano de obra, construcción de juntas, transferencia de cargas a través de juntas, procedimientos para descimbrar y curado (ACI 302R, 2004). En el caso de esta investigación, el uso de esta guía se enfocará en la obtención de las proporciones y mezclas de concreto, debido a que estos son los alcances del proyecto.

3.3.3.1. Resistencia de diseño.

Para elegir este fundamental parámetro de diseño primeramente se recurre al Capítulo 2 del ACI 302 para analizar los tipos de clase de pisos que señala esta guía de diseño, los cuales se describen en la Tabla 2.1. denominada *Clases de pisos con base en el uso pretendido y la técnica de acabado final sugerido* (Tabla 25), la cual se puede consultar en dicha guía.

Como se ha mencionado en al principio de esta investigación, la mezcla de concreto diseñada pretende tener aplicaciones para losas de pavimentos rígidos en zonas industriales y sometidas a fuerte tránsito y cargas de impacto, lo que permite ubicar este tipo de uso en la Clase de piso número 7 denominada de *Dos capas*. A continuación, se presenta un extracto de la Tabla 2.1. del ACI 302.

Tabla 25. Muestra parcial de la Tabla 2.1 del ACI 302.

Clase	Tipo anticipado de tránsito	Uso
	Superficie expuesta a tránsito	
7. Dos capas	industrial vehicular de servicios pesado, es decir, ruedas duras y grandes cargas por ruedas.	Pisos ligados de dos capas sujetos a fuerte tránsito e impacto.

Fuente: ACI-302.1R-04.

Al ubicar la clase de piso del proyecto, se procede a determinar la resistencia a la compresión ($f'c$) a 28 días y el revenimiento máximo permitido haciendo uso de la Tabla

6.1. de la misma guía del ACI recientemente mencionada que se denomina *Resistencia y revenimiento máximo en el punto de colocación para pisos de concreto* (Tabla 26).

Tabla 26. Tabla 6.1. del ACI 302.

Clase de piso	Resistencia a la compresión $f'c$ a los 28 días		Revenimiento máximo	
	MPa	Kg/cm ²	mm	cm
	1, 2 y 3	21	214	125
4, 5 y 6	24	245	125	12.5
7 Base	24	245	125	12.5
7 Superficie de desgaste adherida**	55	561	75	7.5
8 Superficie de desgaste no adherida	28	286	75	7.5
9 Superplano	28	286	125	12.5

**Se requiere un aditivo reductor de agua tipo A para alcanzar el revenimiento máximo.

Fuente: ACI-302.1R-04.

Al hacer un análisis de esta tabla se puede notar que hay dos opciones de ubicar a la Clase de piso 7. La opción ideal sería la que se refiere a *Superficie de desgaste adherida* por su resistencia señalada, debido a que la otra opción presenta una resistencia relativamente fuera del rango, ya que normalmente términos de módulo de ruptura o resistencia a la flexión el rango varía entre 36 y 50 kg/cm², equivaliendo en resistencia a la compresión a un rango aproximado de 275 a 385 kg/cm². Sin embargo, se puede observar que de las resistencias señaladas en la Tabla 26 no hay alguna que se encuentra entre estos rangos para el piso de clase 7, aunque los 561 kg/cm² sobrepasan este rango, es una resistencia sumamente alta que puede entrar en la categoría de los concretos de alta resistencia y para el caso de este proyecto, no es una especificación de diseño requerida.

Entonces, para estos casos, es importante tomar en consideración un comentario que descrito en el mismo ACI 302 respecto a esta tabla (Tabla 26) que menciona lo siguiente:

“La resistencia requerida dependerá de la severidad del uso”. En otras palabras, de acuerdo con las necesidades del proyecto y de las experiencias reportadas, se puede elegir una resistencia adecuada y para esta investigación se ha tomado en consideración la *Guía para el diseño de estructuras de pavimento* del método AASHTO, donde se puede elegir el módulo de ruptura o resistencia a la flexión recomendado de acuerdo al uso que tendrá la losa o piso de concreto dentro de la estructura de pavimento.

Tabla 27. Módulo de ruptura de acuerdo con el método AASHTO.

Tipo de pavimento	MR recomendado (kg/cm²)
Autopistas	48
Carreteras	48
Zonas industriales	45
Urbanas principales	45
Urbanas secundarias	42

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO (1993).

Esta tabla permite ubicar y definir una resistencia a la flexión de diseño de 45 kg/cm² a 28 días requerida para este proyecto.

3.3.3.2. Relación agua/cemento.

Otro de los parámetros de diseño indispensables es la relación agua/cemento, la cual se será de 0.50, recomendable para garantizar la durabilidad del elemento de concreto a edades posteriores los 28 días y durante su vida útil hasta un periodo de 25 años, tal y como lo señala el ACI 302.1R-15 y el ACI 325-9R.

3.3.3.3. Consumo de cemento.

Para poder iniciar a ingresar datos al programa de diseño es importante estimar la posible cantidad de cemento requerida para que la mezcla de concreto logre alcanzar su resistencia estimada. Si bien, el tener una la resistencia de diseño definida puede guiar a estimar una cantidad de cemento, la guía del ACI 302 proporciona en su Tabla 6.2. *Requerimiento mínimo de material cementante para piso* (Tabla 28), una forma práctica

de poder seleccionar un rango de límite mínimo y máximo en el que se debe encontrar la cantidad de cemento seleccionada para el diseño.

Tabla 28. Tabla 6.2. del ACI 302.

Agregado de tamaño máximo nominal	Contenido de material cementante
mm	kg/m³
38	280 a 330
25	310 a 360
19	320 a 375
13	350 a 405
10	360 a 415

Fuente: ACI-302.1R-04.

En este caso, para el diseño de esta investigación se tiene grava de 40 mm, o bien, de 38 mm como se muestra en la Tabla 28 y también se tiene grava de 10 mm. Entonces, para determinar el contenido de cemento se ha propuesto tomar el promedio de la suma de la cantidad mínima y máxima permitida para cada tamaño de grava, descrito mediante las siguientes fórmulas:

Ecuación 1. Contenido de material cementante mínimo promedio.

$$CMC_{Min} = \frac{CMCG1_{Min} + CMCG2_{Min}}{n} \quad Ec. (1)$$

Donde:

CMCP_{Min} = Contenido de material cementante mínimo promedio (kg/m³).

CMCG1_{Min} = Contenido de material cementante de grava 1 mínimo (kg/m³).

CMCG2_{Min} = Contenido de material cementante de grava 2 mínimo (kg/m³).

n = Cantidad de gravas

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación 2. Contenido de material cementante máximo promedio.

$$CMC_{Max} = \frac{CMCG1_{Max} + CMCG2_{Max}}{n} \quad Ec. (2)$$

Donde:

CMCP_{Max} = Contenido de material cementante máximo promedio (kg/m³).

CMCG1_{Max} = Contenido de material cementante de grava 1 máximo (kg/m³).

CMCG2_{Max} = Contenido de material cementante de grava 2 máximo (kg/m³).

n = Cantidad de gravas

Fuente: Elaboración propia.

Al aplicar estas fórmulas en la grava de 38 mm y 10 mm como grava 1 y grava 2 respectivamente, obtenemos lo siguiente:

$$CMC_{Min} = \frac{280 \frac{kg}{m^3} + 360 \frac{kg}{m^3}}{2} = 320 \text{ kg/m}^3$$

$$CMC_{Max} = \frac{330 \frac{kg}{m^3} + 415 \frac{kg}{m^3}}{2} = 372.5 \text{ kg/m}^3$$

El rango de contenido de material cementante combinado de los dos tamaños de gravas diferentes es de 320 – 372.5 kg/m³. Para este caso, se tomará el valor más alto para tener un margen de seguridad que permita otorgar una mayor garantía que la mezcla de concreto diseñada podrá alcanzar su resistencia proyectada, considerando que más adelante con los resultados obtenidos se podrá decidir si se puede reducir esta cantidad de cemento. Entonces, el consumo de cemento para fines de este diseño será de 370 kg/m³.

3.3.3.4. Cantidad de agua.

Este dato se obtiene utilizando la relación a/c señalada y el consumo de cemento obtenido aplicando la siguiente fórmula:

Ecuación 3. Cantidad de agua requerida.

$$CA = \left(\frac{a}{c}\right) (CC) \quad Ec. (3)$$

Donde:

CA = Cantidad de agua requerida (kg/m³).

a/c = Relación agua/cemento (adim).

CC = Consumo de cemento (kg/m³).

Fuente: Elaboración propia.

$$CA = (0.50) \left(370 \frac{kg}{m^3} \right) = 185 \text{ kg/m}^3$$

El obtener esta cantidad de agua requerida, representa un valor estimativo que probablemente aumente al momento de considerar los porcentajes de absorción y humedad al momento de obtener las proporciones finales de los insumos de la mezcla de concreto.

3.3.3.5. Relación grava/arena.

Este parámetro se obtiene mediante el programa de corrección o ajuste del ACI 302, donde se introducen y revisan los parámetros de diseño previamente estimados y calculados, junto con los parámetros de los análisis de agregados de las gravas y arenas seleccionadas para el diseño de la mezcla de concreto. La relación grava/arena (g/a) es un valor adimensional que se compone del porcentaje de grava y arena que contendrá la mezcla de concreto a diseñar, donde estos dos porcentajes serán el resultado final que arrojará el programa de corrección y ajuste.

El primer paso por ejecutar es ingresar los parámetros de diseño que ya se han obtenido en el programa diseñado en una hoja de cálculo de Microsoft Excel que se fundamenta en el diseño de concretos de masa normal de acuerdo con el método de masa y volumen absoluto, descrito por el comité del ACI 211. Un aspecto importante que señalar respecto a la relación g/a, es que se tiene que proponer para poder arrojar cantidades de los agregados que se requieren y poder proceder al ajuste de la mezcla (Figura 36).

Figura 36. Tabla de diseños de mezclas de concreto en Microsoft Excel.

Mezcla: MR45ND4010		f'c = 350 kg/cm ²		Revenimiento 10		± 2 cm	
Material	Identificación	Densidad		Distribución Grava / Arena			
Cemento	CA CPC 40	3.00	%	Arena 1	100	%	Grava / Arena en peso Pg = 2.10 Pa
Adición 1		1.00	0	Arena 2	0	%	
Adición 2		1.00	0				
Arena 1	Cucos Natural	2.61		Grava 1	75	%	
Arena 2		0.00		Grava 2	25	%	
Grava 1	GUSA 40 mm	2.71		Grava 3	0	%	
Grava 2	GUSA 10 mm	2.69					
Grava 3		0.00					
Aditivo 1	Sika P550	1.19		Contenido de arena y grava (l/m ³)			
Aditivo 2	Sika Viscoflow	1.10		Vag = 1000 - 308 = 692			
Material	Consumo		Prop. unit.	Volumen arena: 228			
	Kg/m ³	l/m ³		Volumen grava: 463			
Cemento	370	123	1.000	Vol	Peso	Peso	
Adición 1	0.00	0.00	0.000	Arena 1	228	596	32
Adición 2	0	0	0.000	Arena 2	0	0	
Agua	185	185	0.500	Grava 1:	348	942	68
Vacios	0	0		Grava 2:	116	311	
Arena	596	228	1.610	Grava 3:	0	0	
Grava	1253	463	3.386	Suma:	692	1849	
Suma	2404	1000					

Fuente: Elaboración propia.

En este caso, se puede apreciar un porcentaje de arena propuesto de 33% y por consiguiente el porcentaje de grava corresponde a un 67%. Cabe mencionar que estos porcentajes resultaron ser lo más eficientes para la optimización de materiales y el mejor acomodo de los agregados en la mezcla de concreto, por lo que antes de llegar a estos porcentajes finales, se estuvieron proponiendo otros valores hasta llegar a los más adecuados. Al ejecutar estos porcentajes en el programa, se obtienen las cantidades de arena y grava requeridas para la mezcla de concreto.

Para validar si estas cantidades ofrecerán una buena trabajabilidad y un buen desarrollo de la mezcla de concreto, se procede a tomarse estas cantidades de los materiales y también se tienen que tomar en cuenta las densidades, absorciones y granulometrías anteriormente analizadas de los agregados seleccionados para la mezcla, extrayendo en el caso de la granulometría, los resultados del material que fue retenido, y para comprender como se vacían o se colocan los resultados, se ilustra en la Figura 37, la

tabla de captura referenciada en el ACI 302 y elaborada en una hoja de cálculo de Microsoft Excel.

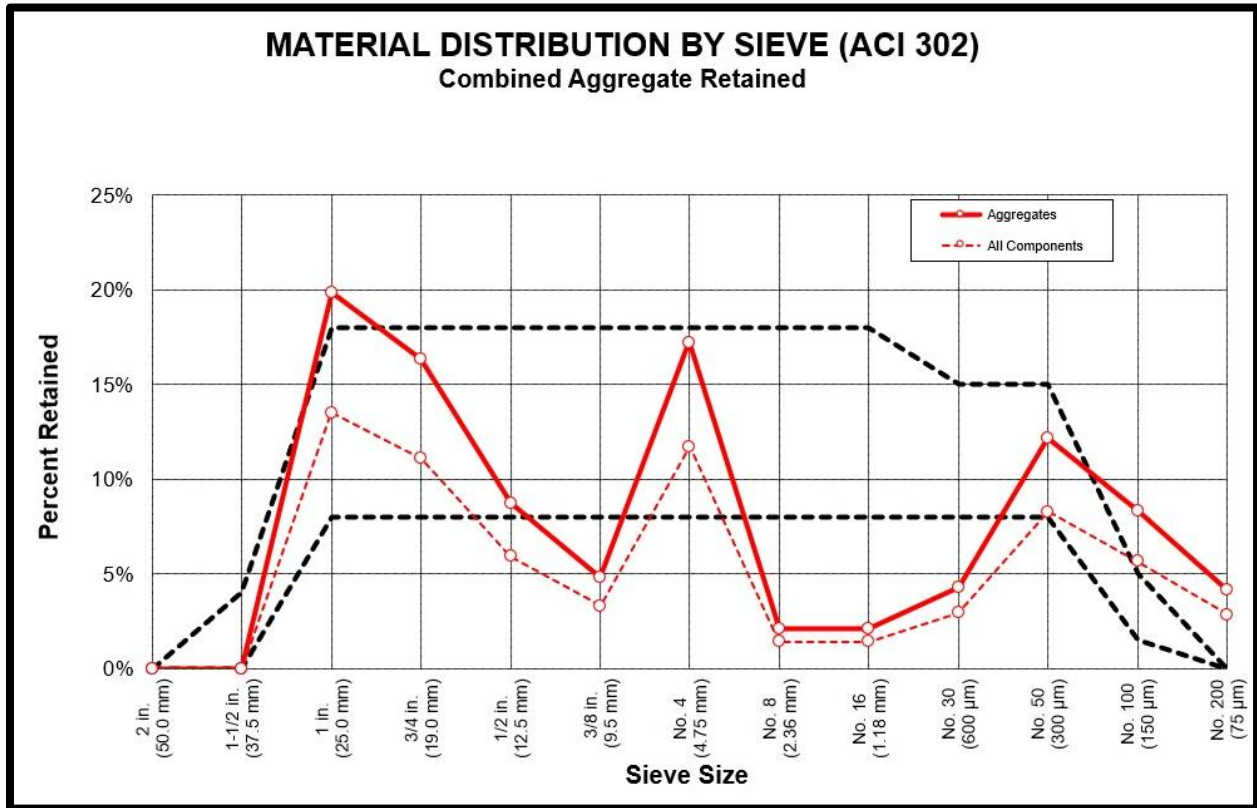
Figura 37. Tabla de captura de datos para análisis de la mezcla.

Coarse Aggregate 40 mm		Coarse Aggregate 10 mm		Fine Aggregate		Dosification by m ³			
Sieve	Retained (grs)	Sieve	Retained (grs)	Sieve	Retained (grs)	Mixture Components	Density (Kg/m3)	Mass Dry (Kg)	Mass SSS (kg)
2 in. (50.0 mm)	0.0	1 in. (25.0 mm)	0.0	3/8 in. (9.5 mm)	0.0	Portland Cement	3050	370.0	370.0
1-1/2 in. (37.5 mm)	0.0	3/4 in. (19.0 mm)	0.0	No. 4 (4.75 mm)	5.4	Fly Ash	1000	0.0	0.0
1 in. (25.0 mm)	3105.6	1/2 in. (12.5 mm)	0.0	No. 8 (2.36 mm)	13.2	Coarse aggregate 40 mm (1 1/2 in)	2710	942.0	945.3
3/4 in. (19.0 mm)	2554.4	3/8 in. (9.5 mm)	43.6	No. 16 (1.18 mm)	31.8	Coarse aggregate 10 mm (3/8 in)	2685	311.0	313.4
1/2 in. (12.5 mm)	1360.4	No. 4 (4.75 mm)	1720.4	No. 30 (600 μm)	65.4	Fine aggregate	2612	596.0	602.0
3/8 in. (9.5 mm)	695.0	No. 8 (2.36 mm)	129.4	No. 50 (300 μm)	184.6	Water	1000	185.0	173.2
No. 4 (4.75 mm)	251.0	No. 16 (1.18 mm)	0.0	No. 100 (150 μm)	126.0	Air	2%	-----	
No. 8 (2.36 mm)	8.0	No. 30 (600 μm)	0.0	No. 200 (75 μm)	63.4	Totals		2404.0	2404.0
No. 16 (1.18 mm)	0.0	No. 50 (300 μm)	0.0	Totals	489.8				
No. 30 (600 μm)	0.0	Totals	1893.4						
No. 50 (300 μm)	0.0								
Totals	7974.4								
% Absorption	0.35	% Absorption	0.79	% Absorption	1.01				

Fuente: ACI-302.1R-04.

Una de las ventajas de poder aplicar este método de diseño, es poder aprovechar el recurso del ajuste y corrección de la cantidad o proporción de los insumos de la mezcla de concreto, demostrando la importancia de analizar las propiedades físicas de los agregados y sobre todo el impacto que tiene el ensaye granulométrico para este análisis del diseño de la mezcla que se puede apreciar en la Gráfica 1.

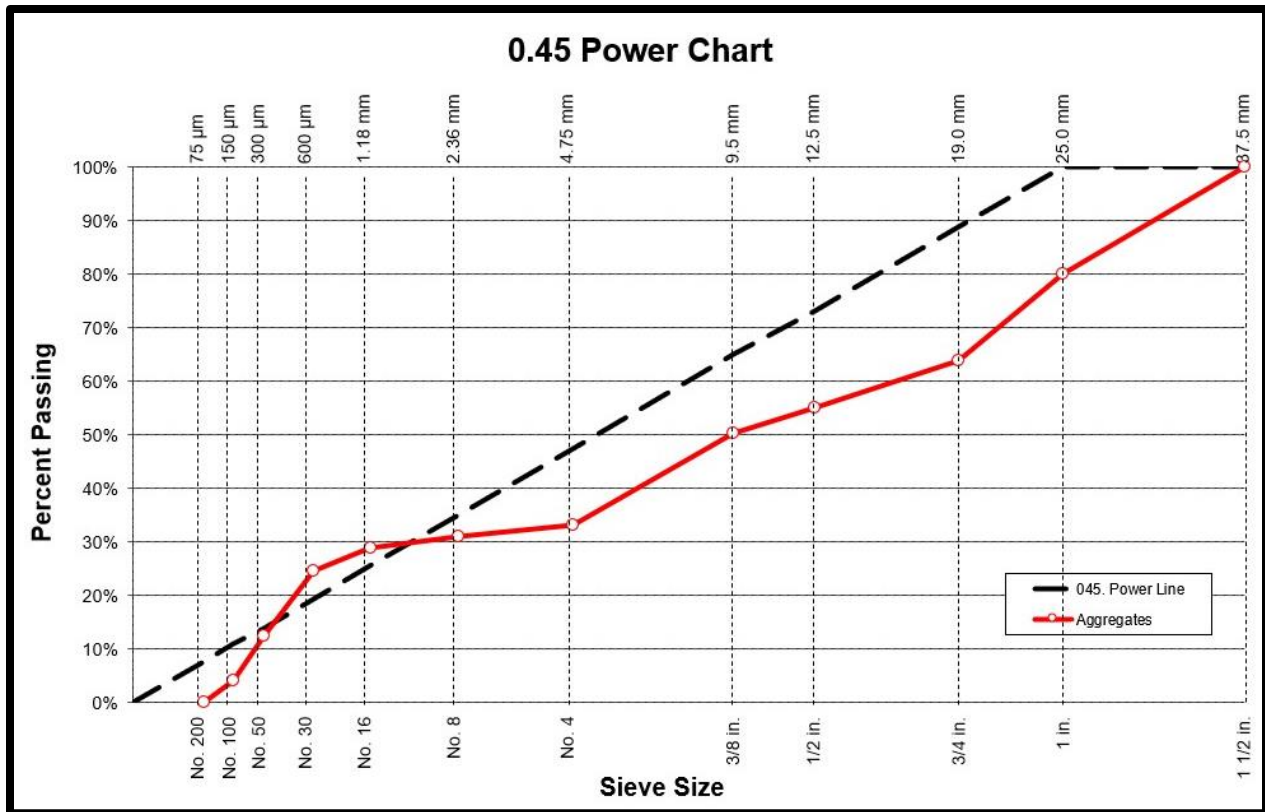
Gráfica 1. Distribución de material por malla.



Fuente: ACI-302.1R-04.

El criterio para que esta gráfica pueda validar que los agregados seleccionados y analizados presenten una distribución uniforme consiste en que los picos de las líneas rojas se puedan ajustar o encontrar dentro del límite máximo y mínimo que está representado con las líneas negras discontinuas. El resultado demuestra que al combinarse el conjunto de agregados, su acomodo y distribución dejará ciertos vacíos debido a que con la relación g/a propuesta le otorga al agregado grueso mayor presencia, pero para continuar validando la distribución de los agregados se realiza otro análisis de la combinación de la granulometría de los agregados a través de la *Carta de la potencia* (Gráfica 2).

Gráfica 2. Carta de la potencia.



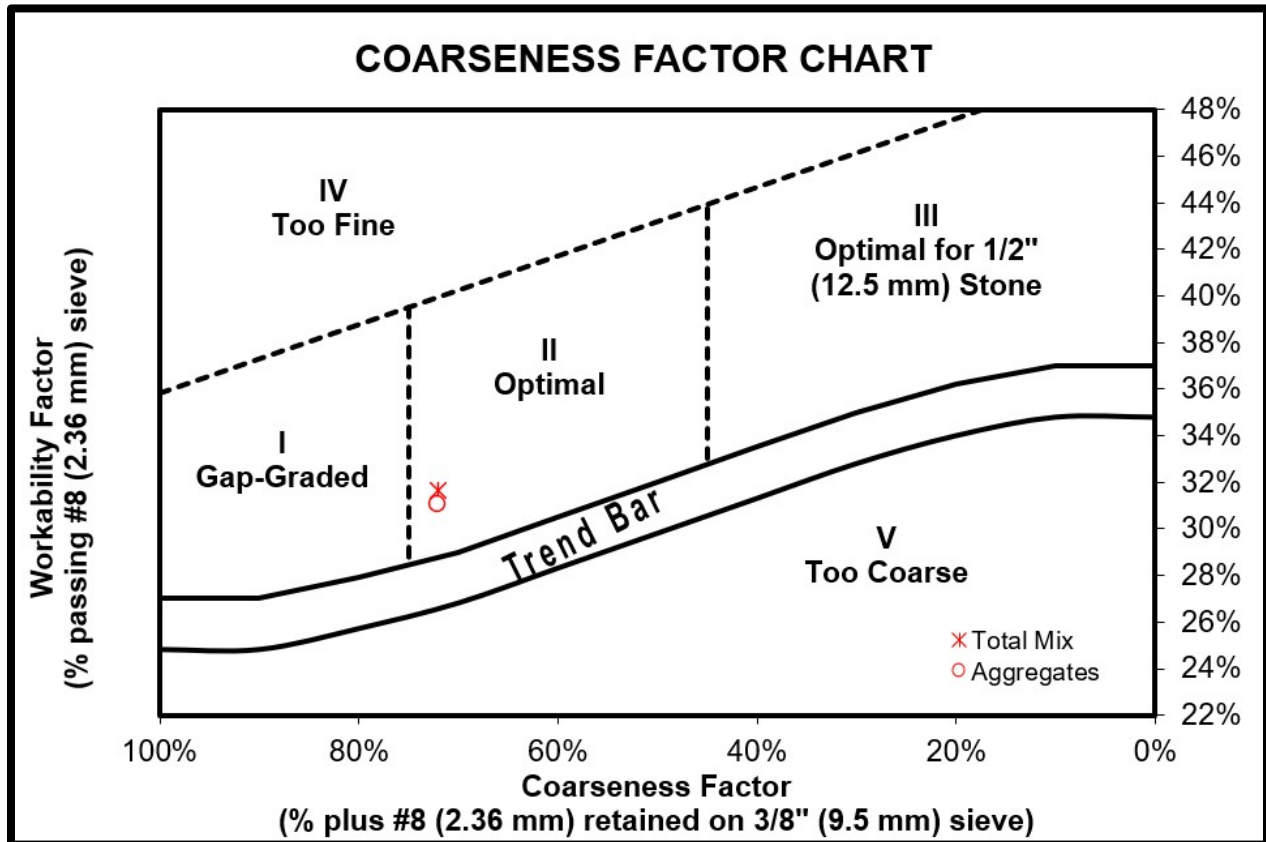
Fuente: ACI-302.1R-04.

Esta carta describe que tan densa puede llegar a ser la granulometría combinada de los agregados, tomándose como punto de partida que la línea negra discontinua representa la trayectoria óptima para una granulometría densa, lo que representa a un conjunto de agregados que al ser combinados, tenderán a no presentar huecos en su acomodo, pero en este caso, la línea roja que señala el comportamiento de los agregados seleccionados, demuestra que en el material fino hay una buena distribución de las partículas de los agregados y conforme se avanza hacia los agregados gruesos, estos carecen de una granulometría eficiente, lo cual se refleja en los análisis granulométricos, demostrándose que la grava de 10 mm (GSMG10) y también la arena, tratan de compensar la falta de distribución uniforme de las partículas de la grava de 40 mm (GTMG40).

Para concluir esta sección de revisiones y ajustes de las proporciones de los agregados, se hace uso de la *Carta de factor de grosor* (Gráfica 3), donde se hace un último análisis de la influencia que genera la combinación de los agregados en el diseño de la mezcla

de concreto y que, en caso de encontrarse dentro de los parámetros recomendados, se puede compensar la falta de distribución uniforme plasmada en las dos gráficas anteriores.

Gráfica 3. Carta de factor de grosor.



Fuente: ACI-302.1R-04.

Al analizar esta gráfica, se puede apreciar que el tamaño y la uniformidad de la distribución de las partículas de los agregados combinados se localiza en la zona II (Óptimo), y de acuerdo con el mismo ACI 302, cuando el desempeño potencial de una mezcla se ubica en esa zona, está puede tener TMN desde 1 ½" hasta ¾", por lo cual esta zona es apta para la mezcla de concreto a diseñar, subsanando la falta de distribución y densidad granulométrica de los agregados gruesos.

De forma general, la relación g/a termina siendo de 2.10, compuesta de 33% de arena y 67% de grava. Para poder llegar a este resultado, inicialmente se propusieron otras relaciones g/a, de manera que se repitieron los pasos anteriores hasta llegar a proponer

y encontrar el valor óptimo que se ajuste a los requerimientos de la mezcla de concreto a diseñar. Al ingresar nuevamente estos parámetros de diseño definidos al programa de hoja de cálculo de Microsoft Excel se obtendrán las proporciones finales de los insumos de la mezcla de concreto.

3.3.4. Proporciones de la mezcla de concreto.

Con base en la aplicación del método de diseño mencionado, se presentan a continuación las proporciones finales para 1 m³ de concreto (Tabla 29).

Tabla 29. Proporciones de los insumos de la mezcla de concreto para 1 m³.

Materiales	Cantidad (kg)
Cemento	370.00
Agua	196.75
Arena	589.72
Grava 1: GTMG 40 mm (1 ½")	938.61
Grava 2: GSMG 10 mm (3/8")	308.62

Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, para la cantidad de especímenes a elaborar por cada mezcla de concreto, se cuantificó el volumen necesario de concreto, resultando en 75 litros. El resultado de las proporciones para cada una de las proporciones de las mezclas de concreto se muestra en la Tabla 30.1 y 30.2.

Tabla 30.1. Proporciones de las mezclas de concreto.

Material	Característica	Unidad	Mezclas de concreto para 75 litros			
			M1	M2	M3	M4
Cemento	CPC40	kg	27.75	27.75	27.75	27.75
Agua	Agua	lt	14.76	14.76	14.76	14.76
Arena	AN	kg	44.23	43.12	42.02	40.91
Grava 1	GTMG40	kg	70.40	70.40	70.40	70.40
Grava 2	GSMG10	kg	23.15	23.15	23.15	23.15

Plástico	HDPE10	kg	0	1.11	2.21	3.32
Aditivo 1	Sika P550	ml	152.60	152.60	152.60	152.60
Aditivo 2	Sika Viscoflow	ml	27.80	27.80	27.80	27.80

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30.2. Proporciones de las mezclas de concreto.

Material	Característica	Unidad	Mezclas de concreto para 75 litros			
			M5	M6	M7	M8
Cemento	CPC40	kg	27.75	27.75	27.75	27.75
Agua	Agua	lt	14.76	14.76	14.76	14.76
Arena	AN	kg	39.81	37.60	35.38	30.96
Grava 1	GTMG40	kg	70.40	70.40	70.40	70.40
Grava 2	GSMG10	kg	23.15	23.15	23.15	23.15
Plástico	HDPE10	kg	4.42	6.64	8.85	13.27
Aditivo 1	Sika P550	ml	152.60	152.60	152.60	152.60
Aditivo 2	Sika Viscoflow	ml	27.80	27.80	27.80	27.80

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Pruebas al concreto hidráulico.

Para verificar y validar el control de calidad del producto final, se siguieron las siguientes normativas mexicanas aplicables para evaluar al concreto en estado fresco y endurecido (Tabla 31).

Tabla 31. Pruebas al concreto en estado fresco y endurecido.

Estado	Prueba	Normativa aplicable
Fresco	Temperatura	NMX-C-435-ONNCCE-2010
	Revenimiento	NMX-C-156-ONNCCE-2010
	Masa unitaria	NMX-C-162-ONNCCE-2014
	Contenido de aire	NMX-C-157-ONNCCE-2006

Endurecido	Resistencia a la compresión	NMX-C-083-ONNCCE-2014
	Resistencia a la flexión	NMX-C-303-ONNCCE-2010

Fuente: Elaboración propia.

Para el mezclado de las mezclas de concreto se aplicó el procedimiento de mezclado mecánico de acuerdo con la NMX-C-159-ONNCCE-2016, utilizándose un mezclador de bandeja horizontal de 100 litros de capacidad (Figura 38).

Figura 38. Bandeja horizontal de 100 litros.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

Para ejecutar las pruebas en estado fresco, primeramente, se aplica la NMX-C-161-ONNCCE-2013 para realizar el muestreo del concreto (Figura 39). De igual manera para la aplicación de las pruebas en estado endurecido se sigue la NMX-C-159-ONNCCE-2016 y la NMX-C-169-ONNCCE-2009 para la preparación y curado adecuado de los especímenes previo a su edad máxima de curado (Figura 40).

Figura 39. Muestreo de la mezcla de concreto.



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

Figura 40. Curado de especímenes



Fuente: Tomada por Soriano (2021).

Se prepararon para cada mezcla de concreto 4 especímenes cilíndricos de 15 cm x 15 cm x 30 cm y 4 vigas prismáticas de 15 cm x 15 cm x 50 cm. La edad de curado fue de 7 y 28 días, repartiendo la mitad de los especímenes y vigas para cada edad.

3.5. Análisis de resultados.

Los resultados obtenidos de la evaluación de las mezclas de concreto en estado fresco y endurecido permitirán validar contra las normas mexicanas si estos productos son factibles ante los distintos parámetros o indicadores a los que son sometidos a prueba, contrastando estos resultados con otros estudios o experimentaciones dentro de la gama de artículos publicados por otros autores, permitiendo así también, validar también el criterio utilizado para esta investigación con el de otros investigadores, lo que conlleva a producir conclusiones finales y posibles áreas de oportunidad para futuras investigaciones.

3.6. Beneficios asociados.

Al obtener resultados de las validaciones de los concretos analizados, es fundamental buscar posibles aportaciones que puedan otorgar este tipo de materiales compuestos, desde su mejora continua u optimización de insumos, así como enlazarlos hacia alguna de las componentes de la sostenibilidad en la medida de lo posible, de tal manera que se demuestre la factibilidad de esta investigación experimental.

3.6.1. Análisis de desgaste de los agregados.

En la siguiente tabla se describen los resultados que se obtuvieron al ejecutar este ensaye en los agregados utilizados para elaborar las mezclas de concreto.

Tabla 32. Resultados de desgaste de los agregados.

Material	Densidad (gr/cm^3)	NMX-C-164-ONNCCE-2014		Cumple
		Límite mínimo	Límite máximo	
Grava de 40 mm (1 1/2")	2.7	2.4	2.9	Si
Grava de 10 mm (3/8")	2.6	2.4	2.9	Si

Arena	2.6	2.4	2.9	Si
Plástico HDPE	0.96	0.94**	0.97**	Si
Arena – Plástico HDPE	1.8	---	---	---

Fuente: Elaboración propia.

Los porcentajes de desgaste indican que los agregados son aptos para cumplir con esta especificación en caso de aplicar estas mezclas de concreto en pavimentos rígidos, favoreciendo la sustitución parcial del agregado plástico por su nulo desgaste e incrementando la resistencia a la abrasión de los agregados naturales.

4. Resultados y discusiones.

4.1. Pruebas al concreto en estado fresco.

Los resultados obtenidos al ejecutar los ensayos a las mezclas de concreto en estado fresco se presentan a continuación.

Tabla 32. Resultados en estado fresco de las mezclas de concreto.

Mezcla	Temperatura (°C)	Revenimiento (cm)	Masa unitaria (kg/m ³)	Rendimiento relativo	Contenido de aire (%)
M1	28.0	12	2380	1.01	1.7
M2	25.5	18	2390	1.01	1.8
M3	27.5	14	2353	1.02	2.3
M4	33.9	8	2303	1.04	2.5
M5	31.6	9	2256	1.07	2.7
M6	30.0	6	2216	1.08	3
M7	28.1	8	2191	1.10	1.9
M8	19.6	3	2112	1.14	2.6

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1. Temperatura.

Las temperaturas registradas presentaron un promedio de 28 °C, esto debido a la época del año en que se realizaron estas pruebas experimentales a la intemperie entre los meses de septiembre y octubre, siendo una temperatura que cumple con la temperatura máxima permitida por el ACI 305 para Climas Cálidos, siendo de 35 °C, incluso hay especificaciones acerca de la exposición de estos climas donde se requiere que el concreto tenga una temperatura en un rango de 29 °C a 32 °C durante su colocación (Kosmatka, 2004; IMCYC, 2010).

Como dato adicional, la Asociación del Cemento Portland (PCA, por sus siglas en inglés), menciona que el efecto que se ocasiona cuando la temperatura inicial del concreto es superior a los 32 °C, se refleja en efectos negativos sobre la resistencia del concreto, como puede ser el desarrollar una resistencia por debajo del 95% a causa de que una temperatura más alta acelera la hidratación del cemento a una fase más temprana, y por lo tanto, se pueden desarrollar estructuras más pobres o porosas en la pasta del concreto.

4.1.2. Revenimiento.

La trabajabilidad de las mezclas de concreto se encontraron alrededor de los 10 cm, cumpliendo con los parámetros permitidos que fueron diseñadas estas mezclas (10 ± 2 cm). La PCA, hace mención que se requiere un ajuste de 3 a 12 kilogramos de agua por metro cubico de concreto, para aumentar el asentamiento de 1.5 a 6 cm, para poder estar dentro del rango de aceptación de la norma mencionada. Esto nos indica que las mezclas presentaron la consistencia esperada para mantener la relación a/c 0.50 (Kosmatka, 2004).

4.1.3. Masa unitaria y rendimiento relativo del concreto.

Las masas unitarias de las mezclas de concreto presentaron un rango de 2112 a 2390 kg/m³, indicando que las mezclas con menor contenido de plástico HDPE entre 0 y 15% de porcentaje de reemplazo, cumplen con lo establecido para concretos estructurales de masa normal de acuerdo con la NMX-C-155-ONNCCE-2014. En cambio, cuando las mezclas han sobrepasado los 15% aproximadamente, sus masas unitarias reflejan que son concretos ligeros. En cuanto al rendimiento relativo de cada mezcla concreto, estos

se encuentran en un rango de 1.01 a 1.14, donde la NMX-C-162-ONNCCE-2014 menciona que un valor mayor que 1.00 produce un exceso volumen con respecto al diseño y menor a 1.00 produce menos volumen con respecto al diseño (Kosmatka, 2004).

Esto indica que el plástico HDPE aumenta su contenido de volumen, lo cual se debe a los vacíos que estos generan, abriendo la oportunidad de optimizar ciertos insumos de la mezcla de concreto pero siempre cuidando que la masa unitaria cumpla con los parámetros establecidos por las normativas mexicanas.

4.1.4. Contenido de aire.

El contenido de aire de las mezclas de concreto se encuentra en un rango de 1.7 a 3%, cumpliendo con el contenido de aire recomendado en el ACI 211 para los concretos sin aire incluido con agregado de tamaño máximo nominal de 10 mm y 40 mm respectivamente.

Los resultados obtenidos de las características del concreto en estado fresco de todas las mezclas elaboradas, indican que en porcentajes de reemplazo de 0 a 10% se mantiene la integridad del concreto de acuerdo a las especificaciones en estado fresco del concreto.

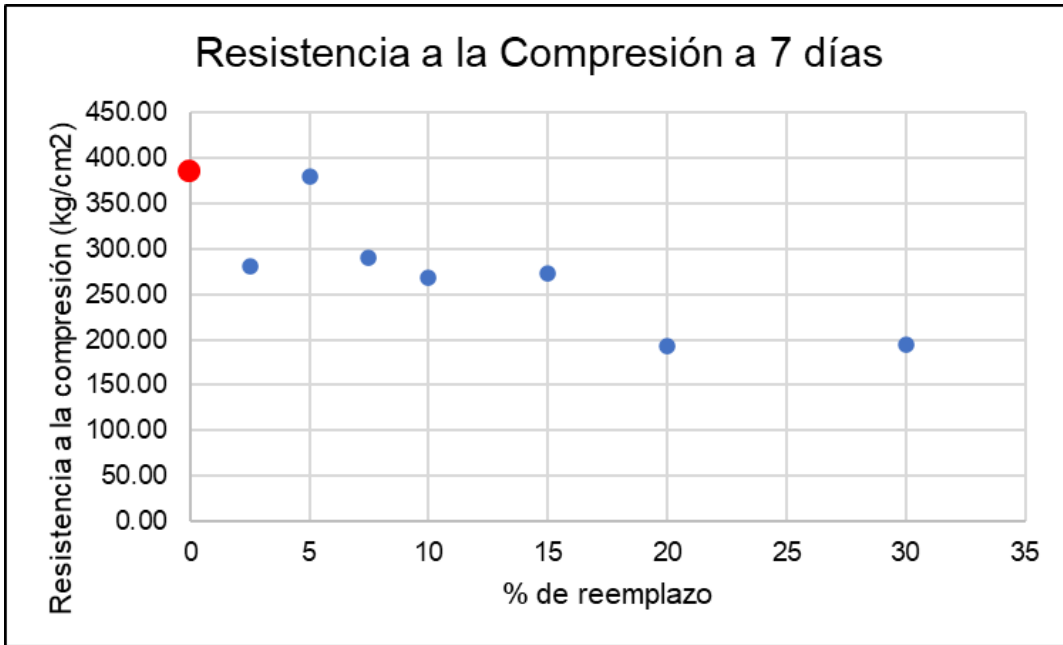
4.2. Pruebas al concreto en estado endurecido.

Los resultados obtenidos al ejecutar los ensayos a las mezclas de concreto en estado endurecido se presentan a continuación.

4.2.1. Resistencia a la compresión.

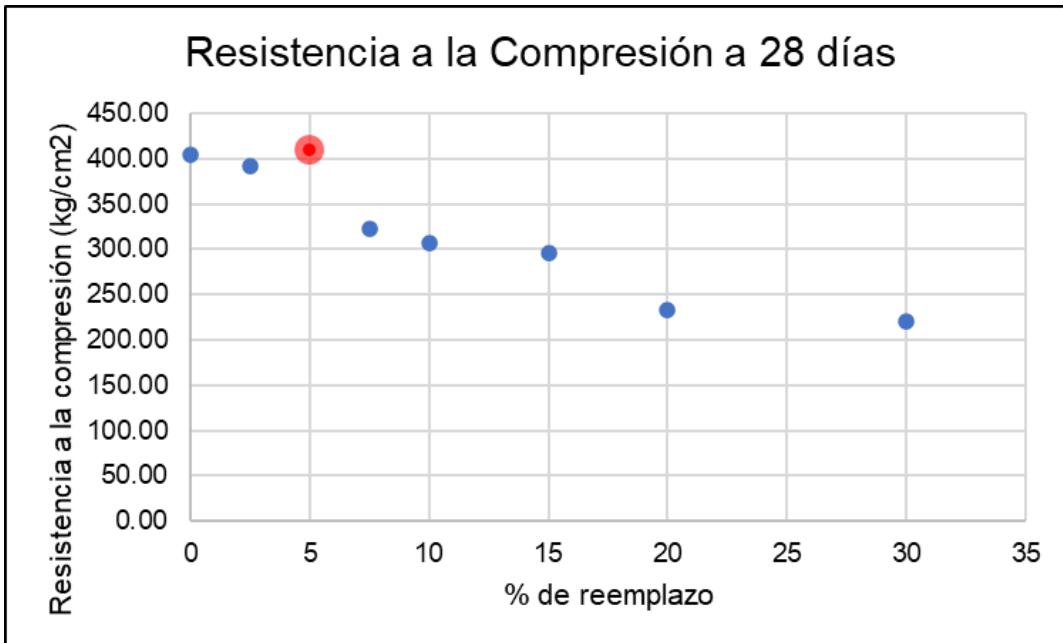
En las siguientes gráficas se ilustran los resultados del comportamiento de las mezclas de concreto sometidas a compresión.

Gráfica 4. Resultados de la resistencia a la compresión a 7 días.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 5. Resultados de la resistencia a la compresión a 28 días.



Fuente: Elaboración propia.

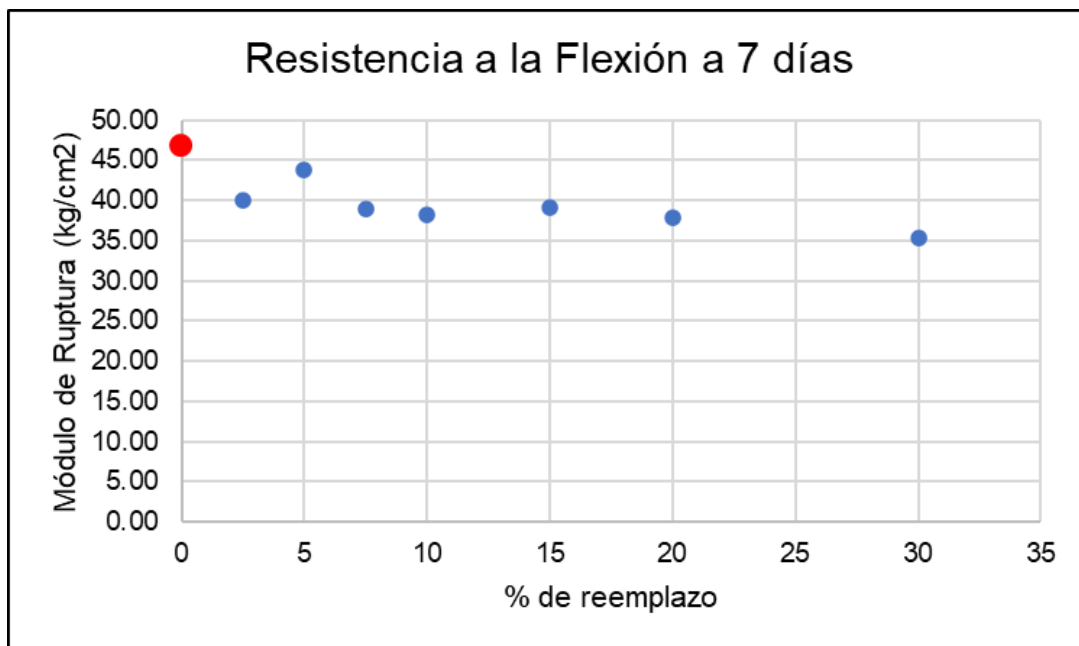
Las resistencias a compresión presentan un rango de 221-409 kg/cm², con un porcentaje de reemplazo óptimo del 5% que supera ligeramente la resistencia de la mezcla de concreto original, es decir, de 405 kg/cm² aumenta a 409 kg/cm². Este comportamiento

se asemeja al que describe [Malagavelli & Neelakanteswara \(2020\)](#) donde con un porcentaje de reemplazo de 3.5% la resistencia tuvo un aumento del 7.69% con un tiempo de curado de 28 días. Hay otros porcentajes que se encuentran dentro de las tolerancias de aceptación ([Tamrin & Nurdiana, 2021](#)); pero su trabajabilidad no es la más adecuada [33]. Para lograr validar que estas mezclas de concreto realmente pueden tener un buen desempeño al someterse a cargas que se presentan en las losas de pavimentos rígidos, hay que observar la Gráfica 6.

4.2.2. Resistencia a la flexión.

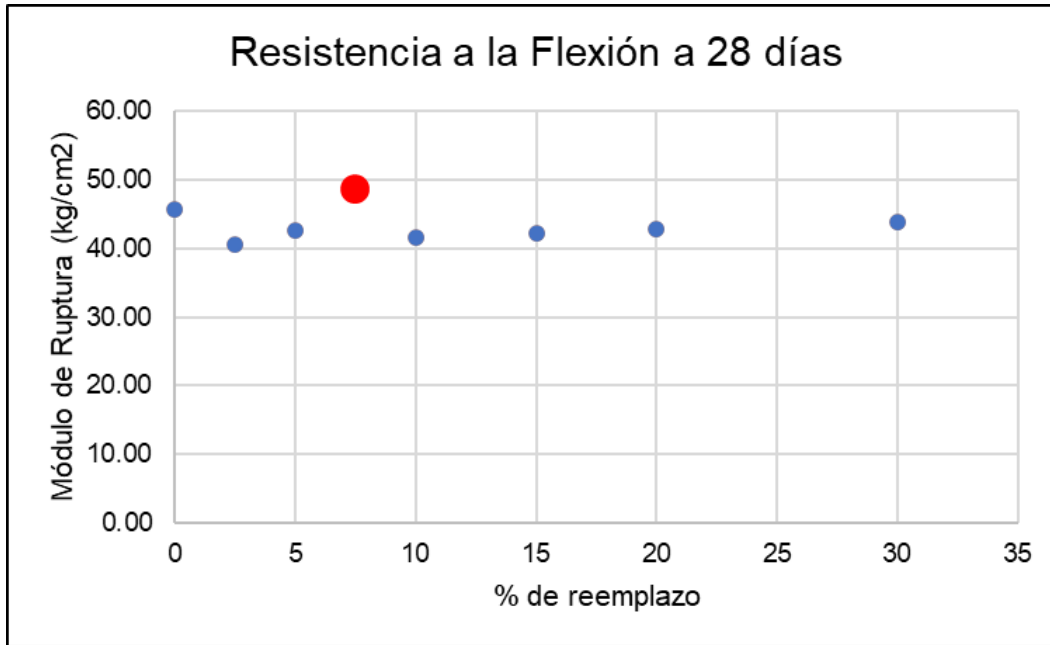
En las siguientes gráficas se ilustran los resultados del comportamiento de las mezclas de concreto sometidas a compresión.

Gráfica 6. Resultados de la resistencia a la flexión a 7 días.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 7. Resultados de la resistencia a la flexión a 28 días.



Fuente: Elaboración propia.

Esta gráfica valida que estas mezclas de concreto tienen un desempeño a la flexión satisfactorio debido a que presentan un rango de 40-49 kg/cm², encontrándose todas las mezclas dentro de tolerancias aceptables si se compara con el caso anterior de resistencia a la compresión. [Pešic et al. \(2016\)](#) demuestra que la incorporación de plástico HDPE en mezclas de concreto aumenta la resistencia a la flexión entre un 3% y un 14%. Incluso, hay estudios donde la incorporación de plástico HDPE mejora la resistencia a la flexión hasta en un 17,47% respecto a una mezcla de control sin plástico ([Malagavelli & Neelakanteswara, 2020](#)). Por ejemplo, [Kobayashi & Sho \(1981\)](#) fue pionero en obtener resultados experimentales de la mejoría de ciertas propiedades del concreto con plástico HDPE incorporado sometido a flexión, como la ductilidad y tenacidad. Sin embargo, como se mencionó en el párrafo anterior, se tiene que determinar un porcentaje de reemplazo ideal y óptimo donde la mezcla de concreto sea trabajable y dúctil, por lo cual el 7.5% será el porcentaje adecuado.

4.2.3. Hallazgos en ensaye de resistencia a la flexión.

Durante la ejecución de los ensayos de resistencia a la flexión, se encontraron hallazgos en lo que refiere al momento del fallo de las vigas prismáticas de concreto como se puede observar en la Tabla 33.

Tabla 33. Tipo de ruptura en resistencia a la flexión.

Mezcla	% Reemplazo Arena - HDPE	Edad	Tercio de falla (Medio o extremos)	Ruptura (Si / No)
M1	0	28 días	Medio	Si
M2	2.5	28 días	Medio	Si
M3	5	28 días	Medio	Si
M4	7.5	28 días	Medio	Si
M5	10	28 días	Medio	Si
M6	15	28 días	Medio	No
M7	20	28 días	Medio	No
M8	30	28 días	Medio	No

Fuente: Elaboración propia.

Las vigas prismáticas que fueron elaboradas con mayor cantidad de plástico HDPE fueron las que no presentaron alguna ruptura al momento del fallo, lo que indica que en caso de usarse este tipo de dosificación de mezcla de concreto, las estructuras en las que se coloque este concreto, podrán avisar con mayor tiempo cuando un elemento estructural este llegando a su tiempo de vida útil.

5. Conclusiones.

Los estudios para reducir la huella de carbono que emite el concreto continúan avanzando, y la alternativa de incorporar residuos plásticos al concreto hidráulico ha resultado una solución de carácter sustentable que permite visualizar escenarios donde se disminuya la presencia de estos residuos en vertederos y se puedan eliminar en el medio ambiente, además de propiciar la conservación de los recursos naturales.

Con los resultados obtenidos se ha pretendido mostrar los impactos positivos y negativos que desarrollan las mezclas de concreto con plástico HDPE en estado fresco y endurecido en función de sus distintos porcentajes de reemplazo. El análisis de agregados es uno de los principios que se tienen que considerar para poder proyectar una mezcla de concreto que sea trabajable y dúctil. Las mezclas de concreto diseñadas y elaboradas con porcentajes de reemplazo de 0%, 2.5%, 5%, 7.5% y 10%, demostraron que su comportamiento en estado fresco es aceptable, pero en cuanto a sus propiedades en estado endurecido, las mezclas idóneas se fueron acotando a causa del grado de ductilidad que presentaron los especímenes sometidos a fuerzas de compresión y flexión, determinando que los porcentajes de reemplazo de 5% y 7.5% para resistencia a la compresión y flexión respectivamente son los parámetros adecuados para que una mezcla de concreto sustentable con incorporación de plástico HDPE pueda poseer propiedades de trabajabilidad y ductilidad aceptables con un módulo de ruptura de 45 kg/cm².

Los resultados de otros autores respaldan los resultados del presente estudio, debido a la similitud de resultados obtenidos. Este tipo de estudios e investigaciones están abriendo un área de oportunidad de poder prevenir los tipos de fallas por fragilidad en las estructuras de concreto y por consecuencia mejorar su ductilidad ([Pešić et al., 2016](#)). Por lo tanto, existe una necesidad de continuar realizando investigaciones que continúen evaluando las propiedades y beneficios que pueden ofrecer los plásticos HDPE incorporados en el concreto ([Yin et al., 2015](#)).

Finalmente, se espera que el presente artículo, contribuya a futuras investigaciones para promover el potencial que presentan las mezclas de concreto hidráulico con incorporación de residuos plásticos, siendo un punto de partida para considerarlo como

un concreto sustentable; y al ser el material más utilizado en la industria de la construcción, se ejecute su aplicación en elementos de concreto estructurales que generarán beneficios ambientales.

6. Referencias.

- Abeysinghe, S., Gunasekara, C., Bandara, C., Nguyen, K., Dissanayake, R., & Mendis, P. (2021). Engineering Performance of Concrete Incorporated with Recycled High-Density Polyethylene (HDPE)—A Systematic Review. *Polymers*, 13(11), 1885. <https://doi.org/10.3390/polym13111885>
- ACI Committee E-701. (2001). ACI Education Bulletin E3-01 "CEMENTITIOUS MATERIALS FOR CONCRETE." *American Concrete Institute*, 1–25. <http://www.concrete.org/general/fE3-01.pdf>
- Babafemi, A., Šavija, B., Paul, S., & Anggraini, V. (2018). Engineering Properties of Concrete with Waste Recycled Plastic: A Review. *Sustainability*, 10(11), 3875. <https://doi.org/10.3390/su10113875>
- Biswas, S. (2020). *Determination of strength characteristics of concrete by partial replacement of aggregates with e waste and hdpe granules. XII(Vi)*, 90–108.
- Brito, J. De, & Kurda, R. (2018). *applied sciences Can We Truly Predict the Compressive Strength of Concrete without Knowing the Properties of Aggregates ?* 1–21. <https://doi.org/10.3390/app8071095>
- Ceballos, M. A. (2016). *El concreto, material fundamental para la infraestructura*. 24–25.
- Correia, J. R., Lima, J. S., & de Brito, J. (2014). Post-fire mechanical performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 53, 187–199. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.004>
- de Brito, J., Kurda, R., & Raposeiro da Silva, P. (2018). Can We Truly Predict the Compressive Strength of Concrete without Knowing the Properties of Aggregates? *Applied Sciences*, 8(7), 1095. <https://doi.org/10.3390/app8071095>

- Galupino, J., Adajar, M. A., Koa, N. C. T., Lao, A. L. S., Lao, R. N. A., Charles, J., & Tan, M. U. (2019). *Response Surface Modelling of Concrete mixed with Fly Ash and Recycled HDPE*. 2012.
- García, S. (2009). Referencias Históricas Y Evolución De Los Plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros Volumen Iberoam. Polim*, 10(101), 71–80.
- Góngora, J. (2014). La industria del plástico en México y el mundo. *Comercio Exterior*, 64(5), 6–9.
http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/761/3/la_industria_del_plastico.pdf
- LeBlanc, R. (2015). How long does it take garbage to decompose. *Richland Center*, 1–2.
http://storage.neic.org/event/docs/1129/how_long_does_it_take_garbage_to_decompose.pdf
- Lopez, N., Collado, E., Diacos, L. A., & Morente, H. D. (2019). Evaluation of Pervious Concrete Utilizing Recycled HDPE as Partial Replacement of Coarse Aggregate with Acrylic as Additive. *MATEC Web of Conferences*, 258, 01018.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201925801018>
- Maruyama, I., & Igarashi, G. (2014). Cement Reaction and Resultant Physical Properties of Cement Paste. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(6), 200–213. <https://doi.org/10.3151/jact.12.200>
- Mechling, J.-M., Lecomte, A., & Diliberto, C. (2009). Relation between cement composition and compressive strength of pure pastes. *Cement and Concrete Composites*, 31(4), 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.009>
- Molina, N. F., Mendoza, K. J., Añez, R. O., & Marulanda, W. U. (2021). Aprovechamiento Sostenible De Residuos Poliméricos Como Agregados Del Concreto: Una Revisión. *Interciencia*, 46(6), 240–247.
- Nadimalla, A., Masjuki, S. A. B., Saad, A. B., Mohd Ismail, K. B., & Bt Ali, M. (2019). Polyethylene terephthalate (PET) bottles waste as fine aggregate in concrete.

International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 8(6 Special Issue 4), 1177–1180. <https://doi.org/10.35940/ijitee.F1243.0486S419>

Napper, I. E., & Thompson, R. C. (2020). Plastic Debris in the Marine Environment: History and Future Challenges. *Global Challenges*, 4(6), 1900081. <https://doi.org/10.1002/gch2.201900081>

Patrício Silva, A. L., Prata, J. C., Walker, T. R., Campos, D., Duarte, A. C., Soares, A. M. V. M., Barcelò, D., & Rocha-Santos, T. (2020). Rethinking and optimising plastic waste management under COVID-19 pandemic: Policy solutions based on redesign and reduction of single-use plastics and personal protective equipment. *Science of The Total Environment*, 742, 140565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140565>

Punitha, V., Sakthieswaran, N., & Ganesh Babu, O. (2021). Experimental investigation of concrete incorporating HDPE plastic waste and metakaolin. *Materials Today: Proceedings*, 37, 1032–1035. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.288>

Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production—present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 642–650. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019>

Shanmugapriya, M., & Santhi, H. (2017). *Strength and Chloride Permeable Properties of Concrete with High Density Strength and Chloride Permeable Properties of Concrete with High Density Polyethylene Wastes*. August.

Silva, R. V., & de Brito, J. (2015). *Use of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Wastes in the Use of recycled aggregates from construction and demolition wastes in the production of structural concrete*. November. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1750.1526>

Stana, Z., & Pešić, N. (2016). *Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres ~ ivanovic*. 115, 362–370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.050>

Tamrin, & Nurdiana, J. (2021). The Effect of Recycled HDPE Plastic Additions on

- Concrete Performance. *Recycling*, 6(1), 18.
<https://doi.org/10.3390/recycling6010018>
- Umashankar, O., Gowreesh, Y. S., Mamatha, K. H., & Dinesh, S. V. (2022). Materials Today : Proceedings Effect of crushing mechanism on the shape properties of coarse aggregates. *Materials Today: Proceedings*, 60, 534–540.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.428>
- Walker, R., & Pavía, S. (2011). Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime–pozzolan pastes. *Materials and Structures*, 44(6), 1139–1150. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9689-2>
- Wang, X., Yu, R., Shui, Z., Song, Q., & Zhang, Z. (2017). Mix design and characteristics evaluation of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete incorporating recycled coral based materials. *Journal of Cleaner Production*, 165, 70–80.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.096>
- Ávila Córdoba, L.I., Martínez-Barrera, G., Barrera-Díaz, C.E., Ureña Núñez, F., & Loza Yáñez, A. (2015). PET de desecho y su uso en concreto. En Martínez Barrera, G., Hernández Zaragoza, J.B., López Lara, T., & Menchaca Campos, C. (Eds.). *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción*. Barcelona, España: OmniaScience. pp. 95-122.
- Tchobanoglous, G. y Kreith, F. (2002). *Manual de Manejo de Residuos Sólidos Segunda Ed.*
- Struble, L., Skalny, J., & Mindess, S. (1980). A review of the cement-aggregate bond. *Cement and concrete research*, 10(2), 277-286.
- De Larrard, F. (1999). *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*. CRC Press.
- García, S. (2009). Referencias históricas y evolución de los plásticos. *Revista Iberoamericana de polímeros*, 10(1), 71-80.
- Yadav, I. S., Kumar, M. G., & Goyal, S. G. (2008). *Laboratory investigations of the properties of concrete containing recycled plastic aggregates (Doctoral dissertation)*.
- Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Bringas, M. S. (1992). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2017). *Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Ensayo*. Disponible en línea: Página de referencia. (consultado el 10 de enero de 2022).

- López, F., Mendizábal, E., & Ortega, P. (2015). Introducción a la ciencia de los polímeros.
- Billmeyer, F. W. (2012). Ciencia de los polímeros. Reverté.
- Bahadur, P., & Sastry, N. V. (2005). Principles of polymer science. Alpha Science Int'l Ltd.
- Andrew, J. P., & Allison, C. (2006). Polymer chemistry: Properties and Applications.
- Hermida, É. (2011). Polimeros: guía didáctica. Ministerio de Educación, Instituto Nacional de Educación Tecnológica, Argentina.
- Bahij, S., Omary, S., Feugeas, F. y Faqiri, A. (2020). Propiedades frescas y endurecidas del concreto que contiene diferentes formas de desechos plásticos: una revisión. *Gestión de residuos* , 113 , 157-175.
- Poonyakan, A., Rachakornkij, M., Wecharatana, M. y Smittakorn, W. (2018). Uso potencial de residuos plásticos para hormigones de baja conductividad térmica. *Materiales* , 11 (10), 1938.
- Fraternali, F., Ciancia, V., Chechile, R., Rizzano, G., Feo, L., & Incarnato, L. (2011). Estudio experimental de las propiedades termomecánicas del hormigón reforzado con fibras de PET reciclado. *Estructuras compuestas* , 93 (9), 2368-2374.

7. Anexos.



CONCRETO en LATINOAMÉRICA

aci
American Concrete Institute

CERTIFICADO DE PARTICIPACIÓN

presentado a:

Mario Erubey Soriano Ruelas

por haber completado los requisitos de asistencia a los 18 seminarios web de Concreto en Latinoamérica con un total de 22 horas, organizado por los Capítulos Latinoamericanos del ACI durante los meses de mayo, junio y julio del 2020.


ING. JOSÉ M. IZQUIERDO ENCARNACIÓN
Ex Presidente
American Concrete Institute


ING. ARTURO GAYTAN COVARRUBIAS
Organizador
Concreto en Latinoamérica





aci
American Concrete Institute
Always advancing

aci
ACI México Capítulo Noroeste A.C.

**AMERICAN CONCRETE INSTITUTE,
ACI MÉXICO CAPÍTULO NOROESTE, A.C.**

otorgan la presente

CONSTANCIA

a

Mario Soriano

POR SU VALIOSA ASISTENCIA AL SEMINARIO VIRTUAL "CONCRETO EN CLIMA CÁLIDO", LLEVADO A CABO LOS DÍAS 27 Y 28 DE AGOSTO DE 2020, EN HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO, CON DURACIÓN DE 5 HORAS.


Ing. Alfredo Martínez Olivas
Presidente (Bienio 2019-2020)
ACI México Capítulo Noroeste


Ing. Oscar Antommattell
Director comité técnico ACI 305
ACI Internacional


Ing. Genaro Salinas
Director Comités Técnicos
ACI México Capítulo Noroeste

129



American Concrete Institute
Always advancing



México Capítulo Noroeste

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE,
ACI MÉXICO CAPÍTULO NOROESTE, A.C.

otorgan la presente

CONSTANCIA

a

Mario Soriano

POR SU VALIOSA ASISTENCIA AL SEMINARIO VIRTUAL "PAVIMENTOS DE CONCRETO - PROYECTO Y DISEÑO", LLEVADO A CABO LOS DÍAS 25 Y 26 DE MARZO DE 2021 EN HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO, CON DURACIÓN DE 7 HORAS.

Ing. Juan C. Rocha Romero
Consejo Consultivo
ACI México Capítulo Noroeste

Ing. Genaro L. Salinas
Director Comités Técnicos
ACI México Capítulo Noroeste

A074



Sección Centro y Sur de México
American Concrete Institute

Otorga la presente

CONSTANCIA

a

Mario Erubey Soriano Ruelas

Por su participación en el

SEMINARIO DE TECNOLOGÍA DE CONCRETO APLICADA A LAS ESTRUCTURAS

SINERGIAS QUE CONSTRUYEN

Celebrado los días 25 y 26 de marzo del 2021

Transmitido vía Streaming

M.C. Alma Reyes Zamorano
Presidenta del ACI
Sección Centro y Sur de México

M.C. Carlos Alfredo Tapia García.
Presidente
Sociedad Mexicana
de Ingeniería Estructural



SMIE[®]
Sociedad Mexicana de
Ingeniería Estructural, A.C.



American Concrete Institute
Always advancing



México Capítulo Noroeste

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE,
ACI MÉXICO CAPÍTULO NOROESTE, A.C.
otorgan la presente

CONSTANCIA

a

Mario Erubey Soriano Ruelas

POR SU VALIOSA ASISTENCIA AL SEMINARIO VIRTUAL “PAVIMENTOS DE CONCRETO – CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO”, LLEVADO A CABO LOS DÍAS 20 Y 21 DE MAYO DE 2021 EN HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO, CON DURACIÓN DE 7 HORAS.



Ing. Juan C. Rocha Romero
Consejo Consultivo
ACI México Capítulo Noroeste



Ing. Genaro L. Salinas
Director Comités Técnicos
ACI México Capítulo Noroeste








A084



American Concrete Institute
Always advancing



México Capítulo Noroeste

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE,
ACI MÉXICO CAPÍTULO NOROESTE, A.C.
otorgan la presente

CONSTANCIA

a

Mario Erubey Soriano Ruelas

POR SU VALIOSA ASISTENCIA AL SEMINARIO VIRTUAL “PISOS INDUSTRIALES”, LLEVADO A CABO LOS DÍAS 15 Y 16 DE JULIO DE 2021 EN HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO, CON DURACIÓN DE 6 HORAS.



Ing. Jesús F. García Arvizu
Presidente (2021-2022)
ACI México Capítulo Noroeste



Ing. Genaro L. Salinas
Director Comités Técnicos
ACI México Capítulo Noroeste











A125



American Concrete Institute
Always advancing



México Capítulo Noroeste

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE,
ACI MÉXICO CAPÍTULO NOROESTE, A.C.
otorgan la presente

CONSTANCIA

a

Mario Erubey Soriano Ruelas

POR SU VALIOSA ASISTENCIA AL SEMINARIO VIRTUAL "MAMPOSTERÍA DE BLOQUE DE CONCRETO", LLEVADO A CABO LOS DÍAS 23 Y 24 DE SEPTIEMBRE DEL 2021 EN HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO, CON DURACIÓN DE 6 HORAS.



Ing. Jesús F. García Arvizu
Presidente (2021-2022)
ACI México Capítulo Noroeste



Ing. Genaro L. Salinas
Director Comités Técnicos
ACI México Capítulo Noroeste



A104



American Concrete Institute
Always advancing



México Capítulo Noroeste

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE,
ACI MÉXICO CAPÍTULO NOROESTE, A.C.
otorgan la presente

CONSTANCIA

a

Mario Erubey Soriano Ruelas

POR SU VALIOSA ASISTENCIA AL SEMINARIO VIRTUAL "CONCRETOS ESPECIALES", LLEVADO A CABO LOS DÍAS 10 Y 11 DE FEBRERO DEL 2022 EN HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO, CON DURACIÓN DE 8 HORAS.



Ing. Jesús F. García Arvizu
Presidente (2021-2022)
ACI México Capítulo Noroeste



Ing. Genaro L. Salinas
Director Comités Técnicos
ACI México Capítulo Noroeste



A124



American Concrete Institute
Always advancing



México Capítulo Noroeste

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE,
ACI MÉXICO CAPÍTULO NOROESTE, A.C.

otorgan la presente

CONSTANCIA

a

Mario Erubey Soriano Ruelas

POR SU VALIOSA ASISTENCIA AL SEMINARIO VIRTUAL "CONCRETOS ESPECIALES" SEGUNDA PARTE, LLEVADO A CABO LOS DÍAS 28 Y 29 DE ABRIL DEL 2022 EN HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO, CON DURACIÓN DE 7 HORAS.



Ing. Jesús F. García Arvizu
Presidente (2021-2022)
ACI México Capítulo Noroeste



Ing. Genaro L. Salinas
Director Comités Técnicos
ACI México Capítulo Noroeste

A058



INBAS

ACC

CALIDRA
SIEMPRE AHÍ

GCC

Holcim

PRENOSA

CEMEX

DEACERO



Tijuana, Mexico
April 30, 2021

ACCEPTANCE LETTER

VII Congreso Internacional de Investigación Tijuana

Dear Jose Manuel Gutierrez Moreno, and Mario Erubey Soriano Ruelas

I am pleased to inform you that your paper with

ID 71,

titled "*Diferencias en el desempeño del concreto sustentable a partir de la incorporación de agregados reciclados*",

has been ACCEPTED for oral presentation in the 2nd Symposium on Applied Sciences for Solving Society's Issues (SASSI '21), which will be held under the 7mo Congreso Internacional de Investigación Tijuana (CI2T 2021), scheduled during May 12-13 at Webinar. All submitted manuscripts for this event were peer reviewed by several experts in their field.

The CI2T 2021 organizing committee will later contact you with more information.

Again, congratulations on your acceptance and we look forward to seeing you at the conference.



Dr. Eduardo Alberto López-Maldonado
CI2T 2021 General Chair



Universidad Autónoma de Baja California
Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería

CI2T

VII CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN TIJUANA

Otorga la presente:

Constancia

a:

Mario Erubey-Soriano Ruelas, José Manuel-Gutiérrez

Por su participación con el trabajo titulado: "Diferencias en el desempeño del concreto sustentable a partir de la incorporación de agregados reciclados", mediante la presentación oral en el 2nd Symposium on Applied Sciences for Solving Society's Issues (SASSSI '21) en el marco del Congreso Internacional de Investigación Tijuana que se llevó a cabo del 12 al 13 de mayo del 2021, en la ciudad de Tijuana, B.C., México.

Dra. Thelma Violeta Ocegueda Miramontes
Track Chair de SASSSI'21

Dr. Eduardo Alberto López Maldonado
Coordinador General de CI2T 2021



Universidad Autónoma de Baja California
Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería

CI2T

VII Congreso Internacional de Investigación Tijuana

Otorga el presente premio del

MEJOR TRABAJO

a: *Mario Erubey-Soriano Ruelas and José Manuel-Gutiérrez*

Por su participación con el trabajo titulado: "Diferencias en el desempeño del concreto sustentable a partir de la incorporación de agregados reciclados", mediante la presentación oral en el 2nd Symposium on Applied Sciences for Solving Society's Issues en el marco del Congreso Internacional de Investigación Tijuana el cual se llevó a cabo del 12 al 13 de mayo del 2021.

Dra. Thelma Violeta Ocegueda Miramontes
Track Chair de SASSSI'21

Dr. Eduardo Alberto López Maldonado
Coordinador General del CI2T 2021
Tijuana, B. C.
12-13 de mayo del 2021

CI2TCongreso Internacional
de Investigación TijuanaTijuana, Baja California, Mexico
March 25, 2022**ACCEPTANCE LETTER**

VIII Congreso Internacional de Investigación Tijuana

Dear: Ing. Mario Erubey Soriano-Ruelas, Dr. José Manuel Gutiérrez-Moreno

I am pleased to inform you that your paper with ID 77, titled "**Desempeño del concreto hidráulico con adición de residuos plásticos: Una alternativa de concreto sustentable**", has been ACCEPTED for oral presentation in the 3rd Symposium on Applied Sciences for Solving Society's Issues, which will be held under the VIII Congreso Internacional de Investigación Tijuana (CI2T 2022) during April 25-28, 2022. All submitted manuscripts for this event were peer reviewed by several experts in their field.

The CI2T 2022 organizing committee will later contact you with more information.

Again, congratulations on your acceptance and we look forward to seeing you at the conference.



Dr. Eduardo Alberto López Maldonado
CI2T 2022 General Chair

Universidad Autónoma de Baja California
Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería**CI2T****VIII Congreso Internacional de Investigación Tijuana**

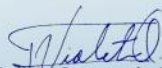
Otorga la presente:

CONSTANCIA

a:

*Ing. Mario Erubey Soriano-Ruelas,**Dr. José Manuel Gutiérrez-Moreno*

Por su participación con el trabajo titulado: "**Desempeño del concreto hidráulico con adición de residuos plásticos: Una alternativa de concreto sustentable**", mediante la presentación oral en el 3rd Symposium on Applied Sciences for Solving Society's Issues en el marco del Congreso Internacional de Investigación Tijuana que se llevó a cabo del 25 al 28 de abril del 2022, en la ciudad de Tijuana, B. C. México.



Thelma Violeta Ocegueda Miramontes
Track Chair de SASSI



Dr. Eduardo A. López Maldonado
Coordinador General del CI2T 2022





Universidad Autónoma de Baja California
Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería

CI2T

VIII Congreso Internacional de Investigación Tijuana

Otorga el presente Premio al:

MEJOR TRABAJO

a:

*Ing. Mario Erubey Soriano-Ruelas,
Dr. José Manuel Gutiérrez-Moreno*

Por su trabajo titulado: **"Desempeño del concreto hidráulico con adición de residuos plásticos: Una alternativa de concreto sustentable"**, presentando en el 3rd Symposium on Applied Sciences for Solving Society's Issues en el marco del Congreso Internacional de Investigación Tijuana que se llevó a cabo del 25 al 28 de abril del 2022, en la ciudad de Tijuana, B. C. México.

Dra. Thelma Violeta Ocegueda Miramontes
Track Chair de SASSI

Dr. Eduardo A. López Maldonado
Coordinador General del CI2T 2022

