

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE  
POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD EN REMPLAZO DEL AGREGADO FINO Y  
VALORACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS CONCRETOS ELABORADOS CON RESIDUOS  
TERMOPLÁSTICOS**



**CARLOS ANDRES MONROY CAMPSTEYN**

ESTUDIANTE DE INGENIERIA CIVIL

**JOHANNA ESGUERRA ARCE**

**PEDRO NEL QUIROGA SAAVEDRA**

DIRECTORES

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**BOGOTÁ-COLOMBIA**

**2020**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

*A mis padres y mi hermana, por su amor y apoyo, a mis amigos, por su constante amistad, a mis profesores por su ejemplo y dedicación. Que en este documento encuentren reflejadas las enseñanzas que me han impartido.*

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

### **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por todas las oportunidades que me ha dado y por permitirme culminar satisfactoriamente este logro; a mi familia por el apoyo y la comprensión que siempre me han brindado en cada meta a la que me he propuesto.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por su apoyo a través de los proyectos, en especial al personal del Laboratorio de Estructuras y Materiales, quienes con su experiencia, bondad y servicio hicieron posible el desarrollo satisfactorio de cada uno de los ensayos realizados. Al ingeniero Pedro Nel Quiroga, por su guía y confianza para desarrollar este trabajo de investigación. Así mismo, a la ingeniera Johana Esguerra Arce, directora del Semillero de Materiales para Aplicaciones Industriales, por sus correcciones, enseñanzas y aportes.

A las empresas Ecopositiva y Color Plastic por el apoyo brindado al proyecto con la donación del material termoplástico triturado con el cual fue posible elaborar las mezclas de concreto.

# EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

## RESUMEN

Siendo el concreto el material de construcción más usado en el mundo (Mobasher, 2008) y el segundo material más consumido en el mundo (Lucy Rodgers, BBC New, 2018), genera un alto consumo de materias primas y una alta extracción de recursos minerales, causando un grave impacto en el medio ambiente, en muchos casos irreparable. Aunque se cuenta con estudios que presentan la factibilidad del uso de materiales termoplásticos en remplazo a los agregados finos de concretos estructurales, se carece de una reglamentación que permita incentivar la utilización en los proyectos constructivos o garantice la efectividad de estos productos, es necesario realizar una mayor investigación acerca del comportamiento, el desempeño y la resistencia de este material al utilizarse en las mezclas de concreto y de las condiciones que debe presentar el agregado plástico para generar un material eficiente.

El presente documento recopila el trabajo investigativo realizado por el autor, generado como proyecto de grado para optar al título de Ingeniero civil con énfasis en Estructuras, Materiales y Construcción, en el cual se presenta un estado del arte acerca de la aplicación de los termoplásticos reciclados en reemplazo de las materias primas utilizadas en la elaboración del concreto y se presentan los resultados obtenidos de la fase experimental en la cual se pretendía demostrar la viabilidad de implementar concretos elaborados con materiales termoplásticos obtenidos en procesos de reciclaje.

El proceso experimental consistió en evaluar el comportamiento de un concreto realizado con una relación agua/cemento de 0.50 y con un diseño de mezcla realizado para resistir una resistencia a la compresión de 21 MPa, se realizaron 4 mezclas en las cuales 3 se reemplazó un 25% del volumen del agregado fino con un volumen semejante dos tipos de materiales termoplásticos diferentes (Poliétileno de Alta Densidad PEAD y Tereftalato de polietileno PET) y una cuarta mezcla en la cual no se le modificaron los volúmenes, con el fin de usar sus resultados como referencia para la investigación: la mezcla 1 presentaba un 100% de agregados pétreos, la mezcla 2 presentaba un 75% de agregados pétreos y un 25% de desecho de PET, la mezcla 3 presentaba un 75% de agregados pétreos y un 25% de desecho de PEAD y la mezcla 4 presentaba un 75% de agregados pétreos y un 12.5% de desecho de PET y 12.5% de desecho de PEAD. El material utilizado en esta investigación fue donado por industrias de recolección y tratamiento de desechos termoplásticos, capaces de triturar el material en partículas de diámetro máximo de 1 cm. Para cada mezcla se elaboraron cilindros y viguetas para realizar los siguientes ensayos de: asentamiento masa unitaria en estado fresco, resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días, módulo de rotura a los 28 días, resistencia a la tensión indirecta a los 28 días y penetración al ion cloruro pasados los 28 días.

Las mezclas elaboradas presentaron buena manejabilidad en estado fresco, con asentamientos entre 7 y 10 cm, no se presentó segregación de los materiales. Para los ensayos de concreto endurecidos se presentaron resultados similares en los ensayos a compresión y módulo de rotura, con respecto a la mezcla 1: la mezcla 3 alcanzó un 75% de las resistencias esperadas, mientras que la mezcla 2 solo alcanzó un 35% y la mezcla 4 alcanzó un 55% de las resistencias esperadas. Al comparar los resultados del ensayo de resistencia a la tensión indirecta, respecto a los resultados obtenidos por la mezcla 1 (mezcla de prueba): la mezcla 3 alcanzó un 38% de las resistencias esperadas, mientras que la mezcla 2 y 4 solo alcanzaron un 30% de la resistencia esperada.

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

### **PALABRAS CLAVE**

Reciclaje, termoplásticos, granulometría, asentamiento, compresión, módulo de rotura y permeabilidad.

# **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

## **ABSTRACT**

Concrete is the most used construction material in the world (Mobasher, 2008) and the second most consumed material in the world (Lucy Rodgers, BBC New, 2018), it generates a high consumption of raw materials and a high extraction of mineral resources, causing a serious impact on the environment, in many cases irreparable. Although there are studies that present the feasibility of the use of thermoplastic materials to replace fine aggregates of structural concretes, there is no regulation to encourage the use in construction projects or guarantee the effectiveness of these products, it is necessary to carry out a Further research on the behavior, performance and resistance of this material when used in concrete mixes and the conditions that plastic aggregate must present to generate an efficient material.

This document compiles the investigative work carried out by the author, generated as a degree project to qualify for the title of Civil Engineering with Emphasis on Structures, in which a state of the art about the application of recycled thermoplastics is presented in replacement of the raw materials used in the preparation of concrete and the results obtained from the experimental phase in which it was intended to demonstrate the viability of implementing concretes made with thermoplastic materials obtained in recycling processes are presented.

The experimental process consisted of evaluating the behavior of a concrete made with a water / cement ratio of 0.50 and with a mix design made to resist a compressive strength of 21 MPa, 4 mixes were made in which 3 were replaced a 25 % of the volume of the fine aggregate with a similar volume, two types of different thermoplastic materials (High Density Polyethylene HDPE and Polyethylene Terephthalate PET) and a fourth mixture in which the volumes were not modified, in order to use their results as reference for research: Mix 1 had 100% stone aggregates, Mix 2 had 75% stone aggregates and 25% PET waste, Mix 3 had 75% stone aggregates and 25% HDPE waste and mixture 4 had 75% stone aggregates and 12.5% PET waste and 12.5% HDPE waste. The material used in this research was donated by thermoplastic waste collection and treatment industries, capable of crushing the material into particles with a maximum diameter of 1 cm. For each mixture, cylinders and beams were made to perform the following tests of: settling unit mass in fresh state, compressive strength at 7, 14 and 28 days, modulus of rupture at 28 days, resistance to indirect tension at 28 days and chloride ion penetration after 28 days.

The elaborated mixtures presented good manageability in fresh state, evidenced, with settlements between 7 and 10 cm, there was no segregation of the materials. For the hardened concrete tests, similar results were presented in the compression and modulus of rupture tests, with respect to mix 1: mix 3 reached 75% of the expected strengths, while mix 2 only reached 35% and Mix 4 reached 55% of the expected strengths. When comparing the results of the indirect stress resistance test, with respect to the results obtained by mixture 1 (test mixture): mixture 3 reached 38% of the expected strengths, while mixture 2 and 4 only reached a 30% of the expected resistance.

## **KEYWORDS**

Recycling, thermoplastics, granulometry, settlement, compression, modulus of rupture and permeability.

# EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

## TABLA DE CONTENIDO

1- INTRODUCCIÓN.....	9
2- OBJETIVOS.....	9
2.1- OBJETIVO GENERAL.....	9
2.2- OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
3- MARCO TEÓRICO.....	10
3.1- INTRODUCCIÓN.....	10
3.2- PLÁSTICOS.....	10
3.2.1- TIPOS DE PLÁSTICOS.....	10
3.2.2- PROPIEDADES DE PLÁSTICOS.....	13
3.2.3- FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO DE LOS TERMOPLÁSTICOS.....	14
3.2.4- PLÁSTICOS RECICLADOS.....	15
3.3- CONCRETO.....	17
3.3.1- DISEÑO Y TIPOS DE CONCRETO.....	17
3.3.2- PROPIEDADES MECÁNICAS DE CONCRETO.....	19
3.3.2.1- ASENTAMIENTO Y MANEJABILIDAD.....	19
3.3.2.2- RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	19
3.3.2.3- RESISTENCIA A LA TENSIÓN.....	20
3.3.2.4- RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.....	20
3.3.2.5- DENSIDAD.....	21
3.3.3- FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO.....	21
3.3.3.1- PRESENCIA DE LIMOS Y ARCILLAS EN LOS AGREGADOS.....	21
3.3.3.2- IONES PRESENTES EN EL AGUA DE MEZCLA Y CURADO.....	22
3.3.3.3- CARBONATACIÓN.....	22
3.3.3.4- PENETRACIÓN DE CLORUROS.....	23
3.3.3.5- PENETRACIÓN DE SULFATOS.....	23
3.3.4- CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS PARA EL DISEÑO DE CONCRETO.....	23
3.3.4.1- PROCEDENCIA GEOLÓGICA.....	24
3.3.4.2- GRANULOMETRÍA.....	25
3.3.4.3- FORMA Y TEXTURA SUPERFICIAL.....	26
3.3.4.4- ABSORCIÓN.....	27
3.3.4.5- DENSIDAD Y MODULO DE ELASTICIDAD.....	27
3.3.4.6- DURABILIDAD Y RESISTENCIA.....	27

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

4- ESTADO DEL ARTE .....	28
4.1-PROCESOS DE INVESTIGACIÓN Y EJECUCIÓN .....	29
5- PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	31
5.1- DISEÑO DE MEZCLAS.....	31
5.2- CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	33
5.3- MODELACIÓN DE HIPÓTESIS Y DESARROLLO DE LOS ENSAYOS .....	36
5.4- GENERALIDADES y moderación DE LOS ENSAYOS .....	38
5.4.1- ASENTAMIENTO .....	38
5.4.2- RESISTENCIA A COMPRESIÓN $f'_c$ .....	38
5.4.3- RESISTENCIA A FLEXIÓN .....	38
5.4.4- TENSIÓN INDIRECTA.....	40
5.4.5- PENETRACIÓN DE CLORUROS .....	40
6- RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	41
6.1- ASENTAMIENTO .....	41
6.2- RESISTENCIA A COMPRESIÓN $f'_c$ .....	41
6.3- RESISTENCIA A FLEXIÓN .....	43
6.4- TENSIÓN INDIRECTA.....	44
6.5- PENETRACIÓN DE CLORUROS .....	45
6.6- COMPARACION Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	46
7-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	48
8- BIBLIOGRAFÍA.....	51
ANEXOS .....	55



# **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

## **1- INTRODUCCIÓN**

El aumento exponencial de la población y de los procesos industrializados, iniciados en el siglo XX, ha provocado la explotación de recursos naturales no renovables a una velocidad superior a la de desecho y descomposición de los productos elaborados con las materias primas explotadas. La generación de residuos de materiales termoplásticos ha aumentado proporcionalmente con el aumento del consumo de productos de diferentes industrias, dada la versatilidad de este material y su alta durabilidad. La problemática ambiental generada por este tipo de desechos ha sido revelada como uno de los grandes problemas de la humanidad, pero la falta de políticas e incentivos a la investigación sobre la reutilización o disposición de este tipo de residuos genera un desconocimiento acerca de cómo reutilizar este material de manera eficiente.

Las prácticas de reciclaje y reutilización de materiales y componentes constructivos son eficientes desde el punto de vista ecológico, económico y social. Permite dar nuevo uso a elementos que ya habrían completado la función por la cual fueron manufacturados y disminuir el volumen de vertidos en los rellenos sanitarios, abarata la elaboración de nuevos productos y disminuye el abastecimiento de materias primas en su producción, la recuperación de materiales permite generar un mercado innovador de productos que mejoraría la calidad de vida de las personas relacionadas directa e indirectamente al mercado ambiental e industrial.

## **2- OBJETIVOS**

### **2.1- OBJETIVO GENERAL**

Valorar las propiedades mecánicas y el comportamiento de concreto con sustitución parcia de agregado fino por termoplásticos que han sufrido un proceso de trituración, con el fin de evaluar la viabilidad técnica y constructiva de incorporar estos residuos en la elaboración de concreto, ya sea como material estructural o arquitectónico.

### **2.2- OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Cuantificar y cualificar las propiedades mecánicas y de comportamiento a las mezclas de concreto que poseen un volumen de material termoplástico en remplazo de un porcentaje del agregado fino.
- Clasificar y comparar las mezclas con agregados termoplásticos reciclado estudiadas con base a los ensayos realizados, según la utilidad que estos pueden presentar en el área construcción.

# EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

## 3- MARCO TEÓRICO

### 3.1- INTRODUCCIÓN

Con el fin de estudiar y comprender el comportamiento de las mezclas de concreto es necesario conocer las características físicas más elementales de las materias primas que lo componen, así como los métodos mediante los cuales podemos cuantificar el comportamiento del material. Par el caso de esta investigación es necesario recopilar una información previa acerca de las propiedades de los polímeros plásticos, enfocándose especialmente en los termoplásticos reciclados, y en las propiedades y el comportamiento típico del concreto. Esto con el fin de poder realizar un sustento teórico del uso de termoplásticos reciclados dentro de las matrices de concreto, que sea posible comprobar con los resultados del programa experimental.

### 3.2-PLASTICOS

El termino término “plástico” deriva del griego “plastikos” (apto para moldear) y de “plastos” (moldeado), al utilizar este término no se está definiendo a un único material, sino una completa familia de materiales sintéticos elaborados a partir de recursos naturales como petróleo, gas natural o carbón que son modificados a través de proceso llamado polimerización, consiste en una reacción química en la cual dos o más moléculas se combinan para conformar una estructura primitiva (monómero) derivada del carbón, la cual se repite en una cadena dando lugar al polímero (macromoléculas formadas por monómeros conectados mediante enlaces covalentes) (acoplasticos, 2019).

Una vez creados los compuestos poliméricos, se lleva a cabo una transformación físico-química mediante procesos de moldeado como: inyección, extrusión, termocomformado, soplado, calandrado, entre otros. Si se trata de productos semielaborados requieren una manipulación posterior como mecanizado, ensamblando, encolado entre otros., que darán lugar al producto final acabado.

#### 3.2.1- TIPOS DE PLÁSTICOS

Existen diversas formas en las que los plásticos pueden ser clasificación ( H., Goodman, Sidney; Dodiuk., Hanna, 2014).:

-Según su origen: Puede hablarse de plásticos naturales, derivados de sustancias de origen vegetal como lo son la celulosa, la caseína o el caucho; aquellos puramente artificiales, derivados del petróleo u otros hidrocarburos; y aquellos que están compuestos de sustancias vegetales e hidrocarburos.

-Según su estructura molecular: De acuerdo a la forma de sus partículas, podemos hablar de: estructuras desorganizadas o amorfas, que poseen grandes espacios para que penetre la luz; estructuras cristalizables que forman cristales rígidos, dependiendo de la velocidad de enfriado; estructuras elastómericas o vulcanizadas, capaces de deformarse frente una fuerza y luego recuperar su rigidez; y estructuras intermedias entre amorfas, cristalizables y vulcanizadas.

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

-Según su reacción al calor, los plásticos pueden identificarse en dos: Los termoestables son aquellos que sufren un cambio químico después de ser calentados, debido a la compleja estructura en forma de red que adquieren, al enfriarse estos materiales adquieren una consistencia sólida que resulta imposible de volver a fundir, se convierten en elementos duros y quebradizos, un ejemplo pueden ser las resinas y los epóxidos (este mismo fenómeno se evidencia en los materiales elastómeros ya que también se ordenan en forma de red de malla); Los termoplásticos no sufren cambios en su estructura química durante el calentamiento, logran adquirir una consistencia líquida y moldeable, se endurecen al enfriarse y se pueden calentar y volver a moldear varias veces, adquiriendo un estado vítreo y logran ser materiales blandos, rígidos o frágiles (acoplásticos, 2018).

Este último tipo de materiales, los termoplásticos, ha adquirido una gran popularidad dentro de las cadenas productivas de varias ramas de la industria, debido a su capacidad de reutilización y su versatilidad para ser moldeable le ha permitido representar el 90% de todos los plásticos producidos. Así como el término "plástico", al hablar de "termoplásticos" se está definiendo a una familia de diferentes materiales plásticos. En 1988 por la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI por sus siglas en inglés), establece un código para identificar los termoplásticos comúnmente más utilizados dentro de las industrias de producción y facilitara el reciclado de estos elementos. Las categorías están numeradas del 1 a la 7, los plásticos del 1 al 6 son los denominados "commodities" debido a que son los de mayor consumo, mientras que en la categoría 7 se encuentran plásticos especiales (IMPI, Enciclopedia del Plástico, 1997):



Imagen 1. Código de identificación para los termoplásticos más comunes

Fuente: [Bloglibresdecontaminanteshormonales.org](http://Bloglibresdecontaminanteshormonales.org)

**1. El Polietileno Tereftalato (PET o PETE):** Es un polímero resultado de la polimerización del etileno, es posiblemente el plástico más popular del mundo, se produce a partir del Ácido Terftálico y Etilenglicol, aunque también puede obtenerse utilizando Dimetiltereftalato en lugar de Ácido Tereftálico. Este material tiene una baja velocidad de cristalización y puede encontrarse en estado amorfo-transparente, en general se caracteriza por su elevada pureza, alta resistencia y tenacidad, presenta propiedades de transparencia y resistencia química.

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

2.El polietileno de alta densidad (PEAD o HDPE): Es un polímero de cadena lineal no ramificada producido a partir de un proceso de polimerización catalítica (catalizador de Ziegler-Natta). Más de la mitad de su uso es para la fabricación de recipientes, empaques, tapas, cierres, utensilios domésticos, juguetes, tuberías y conductos. Su amplia utilización es debido a su bajo costo, flexibilidad, durabilidad, resistencia a muchas sustancias químicas, sustancias esterilizantes, su alta resistencia a esfuerzos y su larga vida útil.

3.El Policloruro de Vinilo (PVC): Es un polímero resultante de la asociación molecular del monómero Cloruro de Vinilo, obtenido a partir del cloruro de sodio o sal común (ClNa) y el petróleo o gas natural, por sí solo es el más inestable de los termoplásticos, pero con la aplicación de aditivos es el más versátil y puede ser sometido a variados procesos para su transformación, lo que lo ha hecho el segundo termoplástico más utilizado después del Polietileno. Es utilizado en la fabricación de aislantes eléctricos, botellas, ductos, empaques, tuberías, tejados, tapices, pisos, paneles, películas protectoras y, piezas de elementos diversos. Son polímeros que presentan propiedades de aislamiento eléctrico y térmico, poseen una excelente durabilidad, resistencia a ambientes agresivos tiene aproximadamente una vida útil de 40 o más años.

4.El polietileno de alta densidad (PEBD o LDPE): Es un polímero de cadena ramificada producido por medio de una polimerización por radicales libres. Su uso es para la fabricación de bolsas, empaques de alta resistencia, piezas de elementos diversos, tubos, mangueras, conductos, aislamiento para cables. Son polímeros con buena procesabilidad, resistencia al impacto, al rasgado y al punzonado, sirven como aislamiento eléctrico y de protección contra la corrosión y los agentes externos (humedad, temperatura, entre otros.).

5.El polipropileno (PP): Es un polímero que se obtiene mediante la unión de monómeros del propileno en presencia de catalizadores alquilmetálicos. Es utilizado en la fabricación de recipientes, depósitos, bolsas, prótesis, mobiliario de diferentes industrias y películas de recubrimiento son polímeros que son utilizados por ser ligeros, tener una alta resistencia a la tensión y a la compresión, un bajo coeficiente de absorción de humedad, propiedades dieléctricas, resistencia a ataques químicos, presenta una estabilidad térmica le permite trabajar durante mucho tiempo a una temperatura de 100°C en el aire y140°C en el agua sin temor a la deformación

6.El poliestireno (PS): Es un polímero resultante de la asociación molecular del monómero estireno, obtenido a partir del calentando el etilbenceno en presencia de un catalizador. Es el cuarto plástico más consumido, por detrás del polietileno, el polipropileno y el PVC: el poliestireno de uso general (GPPS, siglas en inglés) en un material transparente, duro y frágil, es utilizado para la elaboración de piezas y elementos transparentes dentro de diferentes industrias tales como vasos, cucharas, empaques o estuches de CD; el poliestireno extruido (XPS, siglas en inglés) o espuma rígida es uno de los materiales más utilizados para el aislamiento térmico de las viviendas, y como acolchado; El poliestireno de alto impacto o de choque (HIPS, siglas en inglés), se utiliza principalmente en la fabricación de objetos modelados por inyección como carcasas de televisores y computadores, impresoras, frigoríficos, maquinillas de afeitar desechables, juguetes, bandejas y fibras para impresoras 3D; el poliestireno expandido o icopor (EPS, siglas en inglés) es utilizado en la industria de envases desechables, en la industria de la construcción en remplazo al poliestireno extruido y en la industria del almacenamiento y empaque.

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

7.Policarbonato, ABS y otros: Esta categoría fue diseñada con el fin de agrupar a todas las resinas termoplásticas que no fueron mencionadas anteriormente, aunque dentro de esta categoría se encuentran los materiales plásticos menos conocidos y utilizados, su proceso de producción se basa en la creación de cadenas moleculares a partir de diferentes monómeros. Se utilizan para hacer biberones, tazas, botellas, recipientes, piezas de automóviles y de diferentes industrias. Los materiales más conocidos dentro de esta categoría son el policarbonato y el Acrilonitrilo butadieno estireno (PC y ABS, respectivamente, según sus siglas en inglés), debido a su alta producción con respecto a los demás materiales agrupados en esta categoría, los productos fabricados con dichos materiales a menudo son marcados en la parte inferior del icono de reciclaje # 7 con las sigas del material. Dentro de esta categoría se encuentra también una nueva generación de plásticos compostables o biodegradables, hechos a partir de polímeros de base biológica como almidón de maíz, desarrollados con el fin de reemplazar a los policarbonatos. Estos plásticos también pueden ser reconocidos por tener las iniciales “PLA” en la parte inferior del símbolo de reciclaje.

### **3.2.2- PROPIEDADES DE PLÁSTICOS**

Como se mencionó anteriormente, los polímeros (habitualmente llamados plásticos) abarcan una gran familia de materiales compuestos por sustancias químicas orgánicas, sintéticas o semisintéticas. La variada presencia de elementos químicos que componen las cadenas poliméricas, así como el porcentaje que representan estos elementos dentro de la misma, genera una variación en las propiedades esenciales y en el comportamiento de los materiales (estos cambios pueden ser imperceptibles en comparación o llegar a ser un factor importante al comparas uno o más materiales plásticos).

Dado que existe una gran variedad de cadenas poliméricas, incluso dentro de la gama comercial de los plásticos, resulta muy difícil catalogar las diferentes propiedades que poseen los distintos tipos de plásticos, dado que esta no es la finalidad de del presente trabajo, mencionaremos únicamente las características generales de las diferentes propiedades de los plásticos a nivel general.

El proceso de producción de los plásticos de bajo costo debido a que la mayoría de las sustancias químicas que y los elementos necesarios para sintetizar las cadenas poliméricas se obtienen como un subproducto de la refinación del petróleo, ya que posee elementos son demasiado densos o presentan demasiadas impurezas para la producción de los diferentes tipos de combustibles utilizados en diferentes industrias (propano, gasolina, aceites, queroseno, diésel, entre otros.).

Debido a que la estructura interna de los polímeros está constituida por cadenas de monómeros conformados principalmente por partículas de hidrogeno y carbón, agrupadas en estructuras amorfas y semicristalinas, la densidad de estos materiales es baja en comparación al agua y otras sustancias químicas y el punto de fusión es cercano a los 100°C, gracias a estas propiedades los plásticos vírgenes (materiales que no han sufrido ningún proceso físico-químico desde el proceso de polimerización que los conformo como material) tienden a ser maleables y no presentar resistencia a esfuerzos mecánicos cuando se acercan a su punto de fusión, y por tanto pueden ser moldeados en objetos sólidos de diversas formas.

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

Gracias a su estructura semicristalinas los plásticos son capaces de volver a solidificarse y mantener sus propiedades intactas después de un proceso de moldeado, o cual le permite tener un coeficiente de dureza relativamente alto, teniendo en cuenta su amplia capacidad de deformación, la rigidez en su estructura química y la ausencia de electrones libres permite que los plásticos presenten características frente al aislamiento acústico y eléctrico. Debido a la estructura amorfa y al tipo de enlaces entre los elementos que componen a las cadenas poliméricas, los plásticos son capaces de experimentar grandes deformaciones sin llegar a fracturarse y presentar una alta recuperación elástica antes de presentar deformaciones permanentes, es debido a los vacíos que se presentan en la unión de cadenas poliméricas que los plásticos pueden utilizarse como aislantes térmicos, aunque la mayoría no resisten temperaturas muy elevadas estructura amorfa y presenten dilataciones térmicas significativas ante el aumento de temperatura o la fatiga del material. La ausencia de electrones libres dentro de las cadenas poliméricas permite que la mayoría de los plásticos son hidrófugos, lo cual está relacionado con su capacidad de resistir agentes corrosivos del medio ambiente y muchos agentes químicos.

Estas características les asignan a los plásticos las propiedades necesarias para poder elaborar una amplia gama de objetos de diferentes industrias, que no pueden lograrse con otros materiales, sin embargo, estas características pueden variar según el tipo de plástico que se esté estudiando y los aditivos que se utilicen durante el proceso de polimerización para lograr mejorar sus condiciones típicas. A diferencia de los demás plásticos, los termoplásticos poseen una disposición amorfa en la unión de sus cadenas poliméricas que les da la capacidad de reblandecerse de manera reiterativa cuando se exponen a una temperatura cercana a su punto de ebullición y de volver a un estado sólido al enfriarse (sin perder sus propiedades esenciales), sin embargo, cuando los termoplásticos se reblandecen también modifican la disposición y la longitud de las cadenas poliméricas por lo que después de un número limitado de recalentamientos, el material pierde sus propiedades físicas y mecánicas.

### **3.2.3- FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO DE LOS TERMOPLÁSTICOS**

La degradación en los polímeros se refiere al cambio indeseable de las propiedades físicas, químicas y mecánicas, debido a una modificación en el entorno que deriva en la interacción con un agente o una fuerza que puede causar degradación, de acuerdo al modo de interacción la degradación podría ser térmica, física, química, electroquímica, fotoquímica, radioactiva o biológica (teniendo en cuenta que en un entorno real los polímeros se verán afectados por todos los factores mencionados anteriormente (siendo uno o algunos en específico más determinantes que otros). Debido a que este tema es muy amplio y no abarca en su totalidad el tema de a investigar, se mencionara brevemente los factores que generan una degradación en el comportamiento de los termoplásticos (B. Posada Bustamante, 2012).

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

Degradación física: se refiere a efectos de las fuerzas mecánicas que se relacionan con las cargas estáticas o dinámicas, el desgaste abrasivo obtenido por el impacto de partículas suspendidas en un fluido con el material (producen una pequeña marca en la superficie del material con cada contacto y puede llegar a ser notable y relevante en algunas circunstancias), la fatiga debida a las cargas cíclicas. Los procesos de fabricación (mezclado, molido, laminación, estirado, procesamiento en extrusoras, entre otros.) y modelado (corte, serruchado, limado, taladrado, torneado, fresado, entre otros.) también pueden imponer esfuerzos o deformaciones que pueden afectar el comportamiento de los termoplásticos

Degradaciones térmicas: debido al aumento de temperaturas o a la aplicación de acciones repetitivas o de desgaste, pueden presentarse cambios en la estructura interna que aumentan o disminuyen las tensiones internas (esto involucra la separación de cadenas poliméricas y la redistribución de las mismas) hasta provocar la falla. En casos especiales las cadenas moleculares pueden comenzar a deformarse o fragmentarse debido a la evaporación de algunos elementos o compuestos químicos (radicales o iones libres combinados con H<sub>2</sub>, CO, entre otros.), Esto se debe a que los enlaces covalentes y tienen una resistencia limitada, que es vencida por el calor.

Degradación por radioactividad: la acción de la luz ultravioleta, las radiaciones electromagnéticas (microondas, infrarroja, rayos X y rayos gamma) y la radiación fotónica (protones, rayos beta, rayos alfa y neutrones) resultan el cruce intermolecular de las cadenas poliméricas o la reducción de las mismas, la radiación debida a la luz visible y la luz ultravioleta suelen ser los fenómenos que afectan comúnmente a los termoplásticos, especialmente cuando se trata con especímenes de espesores limitados

Degradación biológica: la acción de la humedad, el moho, las bacterias y los microorganismos no suele ser agresiva. Hay bacterias aerobias y anaerobias que tienen un fuerte influjo en la corrosión de los termoplásticos, sobre todo si quedan atrapadas dentro de la matriz polimérica durante los procesos de polimerización, afectan de la estabilidad dimensional y las propiedades mecánicas internas del material.

Degradación química: puede presentarse de manera directa en los contaminantes reaccionan de manera irreversible o de manera indirecta mediante la retención de contaminantes y sufren que pueden experimentar cambios químicos en contacto con otros elementos, al igual que la degradación biológica, no suele ser agresiva una vez se ha modelado el material, puede presentar se cómo un agente corrosivo durante los procesos de polimerización y modelado. Las excepciones más relevantes son el dióxido de nitrógeno, el dióxido de azufre y el ozono

### **3.2.4- PLÁSTICOS RECICLADOS**

La recolección y reutilización del plástico es una actividad relativamente nueva, las técnicas de reciclaje están poco desarrolladas y el interés del mercado general es reciente, para la década 1980 no se reciclaba casi nada y no se conocía el daño que generarían todos los residuos plásticos del planeta. Ahora cada vez tenemos más información sobre la composición de los materiales que usamos en nuestro día a día y nos permite decidir el formato de consumo y como desechar los subproductos de nuestro consumo.

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

El reciclaje plástico es un mediante el cual se puede recuperar parte de las resinas plásticas que se encuentran en los residuos de consumo para fabricar nuevos productos. Una de las opciones más utilizadas es el reciclaje mecánico mediante el cual se peletizar de los residuos plásticos a través de procesos de trituración y termofusión, de acuerdo con Cicloplast (sociedad sin ánimo de lucro española, comprometida con en la promoción del reciclaje plástico) este proceso se puede repetir por 4 o 5 ciclos ya que este proceso implica una transformación física del material y una deformación de la estructura química y de las propiedades físico-mecánicas del material. El reciclaje químico consiste en la descomposición del polímero para poder obtener hidrocarburos que pueden emplearse en diversas aplicaciones o para obtener cadenas de monómeros no alterados que pueden ser empleados en nuevos procesos de polimerización para obtener nuevo material plástico con calidad equivalente al material virgen, a diferencia del reciclaje mecánico, el reciclaje químico se encuentra mucho menos desarrollado y extendido y hoy en día es difícil de encontrar a escala industrial, sin embargo, el reciclaje químico resalta por su capacidad de ser aplicado a materiales para los que el reciclaje mecánico no es viable, debido a la elevada contaminación orgánica que estos materiales presentan.

A pesar de los diferentes métodos para reutilizar el plástico, existen diversas situaciones por las cuales el reciclaje del plástico a través de la descomposición presenta complicaciones y limitantes para poder ser aplicado: la presencia de material orgánico, pigmentación del material, presencia de agentes corrosivos o la disposición de los plásticos en medios como el mar (agua salada). Una de las dificultades de mayor relevancia tiene que ver con la incapacidad que tienen los materiales termoplásticos de por reciclarse entre ellos mismos, la composición química de los diferentes monómeros es tan variada que fusión entre estos materiales produce un material heterogéneo el cual no presenta ninguna resistencia mecánica relevante ni un comportamiento similar al de los materiales combinados, esta es la razón por la cual los diferentes termoplásticos comerciales poseen una identificación numerada del 1 al 6 dentro de la clasificación para reciclarlo y por la que para los plásticos #7 los protocolos de reutilización y el reciclado de no están estandarizados y no suelen reciclarse. Debido a lo anterior, se han planteado diferentes propuestas para poder aprovechar lo desechos termoplásticos sin la necesidad de un proceso de clasificación y reciclaje.

El proyecto de reutilización de los plásticos se basa en la incineración de residuos para el aprovechamiento energético, la quema de plástico y otros desechos municipales pueden producir suficiente calor y vapor para girar las aspas de las turbinas y generar electricidad para la red local, sin embargo, estas plantas de conversión de residuos en energía tienen el potencial de emitir contaminantes tóxicos como las dioxinas, los gases ácidos y los metales pesados. países que carecen de leyes ambientales o de una aplicación estricta de las mismas, pueden intentar ahorrar dinero en los controles de emisiones, depuradores, precipitadores y filtros sofisticados para capturar contaminantes, de acuerdo con el informe de 2017 del Consejo Mundial de la Energía, "estas tecnologías son útiles siempre que las plantas de combustión funcionen correctamente y las emisiones se controlen".



## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

Otro proyecto de reutilización de los plásticos consiste en el reforzamiento de los suelos y la estabilización de los taludes a través del uso de plásticos. Ya que los suelos confinados sometidos a esfuerzo de tracción pueden fallar fácilmente y la resistencia a corte está condicionada por su cohesión. La fuerza de fricción interna del suelo podría ser incrementada agregando materiales de refuerzo y se ha encontrado que el plástico es un material resistente a esfuerzos de tracción y que agregado en el suelo resulta favorable para complementar la resistencia a la que pueden ser sometidos estos. El uso de plásticos triturados o refuerzos elaborados a partir de este material se aplican no solamente en esta teoría, además se han hecho estudios para aumentar la resistencia de suelos, taludes estructuras de construcción en tierra, reforzamiento de edificaciones de mampostería no confinada y para aumentar las propiedades de las mezclas de concreto.

### **3.3-CONCRETO**

A lo largo de la historia, los seres humanos han buscado un material de construcción que sea moldeable y sea capaz de resistir grandes esfuerzos, principalmente a compresión. El término “concreto” deriva del latín “concrētus” (agregado o condensado), llamado hormigón en España y en varios países de Hispanoamérica (RAE, 2020), es un material que históricamente ha estado compuesto por partículas áridas de diferentes tamaños que cohesionan a través de un aglomerante (de origen silíceo) que es humedecido con agua para generar la adherencia y maleabilidad deseada. Después de un periodo de tiempo, esta mezcla logra solidificarse y adquirir una a la resistencia mecánica.

En la actualidad las partículas áridas o agregados pétreos que son utilizadas en la creación del concreto se clasifican en partículas gruesas y finas (denominadas coloquialmente grava y arena, respectivamente), el aglomerante utilizado es el cemento, generalmente el cemento portland (originalmente se utilizaba la caliza). En la actualidad estos materiales se mezclan con el agua en una proporción adecuada para que la pasta de cemento presente una resistencia similar a la de los agregados pétreos y se agregan aditivos especialmente diseñados para modificar las características de la mezcla mientras el maleable que pueden tener repercusiones en las propiedades mecánicas del elemento cuanto se solidifica.

#### **3.3.1- DISEÑO Y TIPOS DE CONCRETO**

Gracias a las propiedades mecánicas que posee el concreto y a las limitaciones de materia prima para utilizar otros materiales de construcción, desde el siglo XVIII volvió a utilizarse el concreto (material que en la antigua Roma ya se utilizaba con características similares a las actuales). A lo largo de los siglos se ha logrado demostrar cualitativamente y cuantitativamente como las propiedades de la materia prima para la fabricación del concreto (cemento, agregado grueso, agregado fino, agua, y aditivos), los volúmenes utilizados e incluso la forma de mezclar los materiales afectan sustancialmente el comportamiento del concreto frente a agentes externos como al ambiente y las cargas sobre impuestas a este material.

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

Organizaciones como el instituto Americano del Concreto (ACI por sus siglas en ingles), la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en ingles), la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE por sus siglas en ingles), la Organización Internacional de Estandarización (ISO por sus siglas en inglés), entre otras organizaciones y universidades, han realizado una gran cantidad de investigaciones y trabajos relacionados con los aspectos teóricos de la creación y el diseño de mezclas de concreto (proceso en el cual se cuantifican las cantidades necesarias para la elaboración de una mezcla de concreto, en cierta cantidad, que posea ciertas propiedades de comportamiento tanto en estado sólido como semilíquido), si bien el diseño de una mezcla de concreto es un procedimiento que se basa en modelos empíricos, el concreto posee varias propiedades de estudio con las que se desea principalmente:

- Poseer una manejabilidad apropiada para modelar diferentes formas en un tiempo determinado.
- Lograr una resistencia mecánica a los esfuerzos a compresión específica para una edad determinada (3-90 días).
- Obtener una durabilidad o resistencia a los esfuerzos reducidos por el ambiente al cual está expuesto el material.
- Lograr un acabado estético o atractivo a la vista, sin perder las propiedades anteriormente mencionadas.

Los estudios realizados para obtener las 4 propiedades mencionadas anteriormente han derivado en el descubrimiento, la producción y la implementación masiva de materiales como:

- Concretos convencionales: Mezclas de concreto que son capaces de obtener una resistencia mecánica a los esfuerzos a compresión bajos (entre 17 y 46 MPa), que pueden presentar cierto grado de maleabilidad (dependiendo de los materiales de mezcla) y puede presentar un acabado exterior liso o poco rugoso. el uso de aditivos en este tipo de mezclas es común para obtener un incremento en la durabilidad, el en tiempo de transporte y maleabilidad, su resistencia a agentes corrosivos y a la disminución en su tiempo de fraguado, su permeabilidad y en su contracción, entre otros. (V.E Alvarán,2018).
- concreto de ultra alta resistencia: Mezclas de concreto que son capaces de obtener una resistencia mecánica superior a los concretos convencionales (de 46 a 200 Mpa), debido a los materiales que posee y a la densidad de la mezcla, resiste ataques corrosivos naturales o artificiales.
- Concreto liviano: Posee una baja densidad, sin que esto afecte su resistencia mecánica, que no es superior a la de los concretos convencionales, es utilizado para reducir la carga muerta de una estructura de concreto, lo que permite reducir las dimensiones de elementos estructurales como columnas y cimientos. (V.E Alvarán,2018).
- Concreto traslúcido: se trata de un concreto que tiene la habilidad de permitir el paso de la luz (en casi todo el rango del espectro visible) permitiendo ver formas, luces y colores. esta habilidad no impide que sea un material aún más resistente que el concreto convencional y con una densidad menor, esto debido a los materiales que se encuentran dentro de la mezcla (cemento blanco, fibras ópticas, capas poliméricas, entre otros) (Asocreto, 2020).
- El concreto con agregados reciclados: El uso de agregados reciclados (residuos de obra, concreto reciclado o polímeros) dentro de las mezclas de concreto ayuda a solucionar problemas de contaminación ambiental, podría generar ahorros económicos, no afectar en alto grado las

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

propiedades mecánicas y disminuir la explotación de canteras y la dependencia de agregados pétreos(V.E Alvarán,2018).

- El uso de agregados poliméricos implica además una disminución en el consumo de agua por parte del agregado y una disminución en los efectos debidos a los agentes corrosivos, ya que estas partículas además de ser hidrofóbicas presentan una mejor resistencia a agentes corrosivos como el cloro o el CO<sub>2</sub>

### **3.3.2- PROPIEDADES MECÁNICAS DE CONCRETO**

Como se mencionó anteriormente, el diseño de las mezclas se originó de un modelo empírico que buscaba la creación un material tan duro como la roca pero que fuera fácil de moldear y transportar, el concreto posee varias propiedades de estudio, a continuación, mencionamos las principales propiedades a tener en cuenta para un diseño de mezcla.

#### **3.3.2.1- ASENTAMIENTO Y MANEJABILIDAD**

La manejabilidad se refiere a la propiedad que le permite al concreto en estado semilíquido o concreto fresco ser mezclado, manejado, moldeado, compactado y afinado, así como la habilidad de llenar un molde de tal forma que al solidificarse se obtenga la un elemento con la forma del molde que lo contenía. Al hablar de asentamiento en el concreto nos referimos a la habilidad que posee una mezcla de concreto fresco de poseer un grado de manejabilidad sin que esto afecte el comportamiento de las demás propiedades del material cuanto el concreto se solidifique, esto incluye la textura externa del elemento (relacionada con la estética del elemento y además con la penetración de agentes corrosivos al núcleo del elemento), las fuerzas a las que puede ser sometido elemento después de solidificarse (conociendo los esfuerzos que puede soportar un elemento esta relacionados con el área de la sección transversal del mismo) y la segregación (separación del cemento, el agua, los agregados gruesos y los agregados finos).

#### **3.3.2.2- RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

Al imaginar la mezcla de concreto que sea capaz de soportar el mayor esfuerzo a compresión, naturalmente viene a la idea una mezcla que esté compuesta principalmente de agregado grueso, ya que la grava proviene de algún mineral que antes era una roca (material de construcción remplazado por el concreto). Es posible que esto se acercara a la realidad, cuando el aglomerante humedecido que utilizaba el concreto era la caliza no calcinada o el yeso (material utilizado antiguamente en las mezclas usadas por los romanos y los egipcios, respectivamente), sin embargo la evolución que ha presentado el cemento y el cemento portland especialmente permite hablar de elementos de creados únicamente con cemento hidráulico que presentan una resistencia a la compresión igual a la de una mezcla de concreto compuesta de cemento y agregados gruesos o a un elemento pétreo.

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

El uso de una mezcla de concreto que presente una matriz compuesta por cemento, agregados pétreos gruesos y finos se debe a un factor económico y de optimización de los recursos. La idea de un material que fuera capaz de remplazar a la roca en el siglo XVIII se debe principalmente a la sobreexplotación de las canteras de esa época y a la alta demanda de este material en cantidades excesivas y en dimensiones, sin embargo, la producción del cemento tiene un costo muy elevado y al ser este material diseñado para ser resistente como la roca era posible mezclarlo con partículas minerales como la arena, la grava o los residuos de canteras, materiales que eran abundantes y considerados como residuos de la explotación de otros recursos. En la actualidad, la demanda de agregados pétreos y de minerales silíceos para la elaboración del concreto, acompañada de un aumento en la conciencia social por la explotación de recursos no renovables, ha desencadenado en la clausura de canteras dedicadas a la extracción de material para la elaboración del cemento y los agregados gruesos y finos, lo cual ha desencadenado en la investigación y producción de “cementos verdes”, concretos reciclados y el uso de materiales o elementos considerados desechables o residuos en las matrices del concreto (sin que el uso de estos materiales afecte la propiedad más importante a tener en cuenta para el diseño de elementos estructurales y de las mezclas de concreto, la resistencia a la compresión).

### **3.3.2.3- RESISTENCIA A LA TENSIÓN**

Para el diseño de las mezclas y los elementos de concreto no se suele tener en cuenta la resistencia a la tensión. dado que el concreto está conformado por elementos calcicos y silicios, los cuales suelen tener una baja resistencia a tensión, en comparación con su resistencia a compresión, la resistencia que pueda presentar el material es por lo general ignorado o despreciada para los diseños (suelen adoptarse valores de entre el 5%-10% de la resistencia a la compresión), sin embargo, este factor tiende a adquirir relevancia cuando se estudia el comportamiento del concreto a los esfuerzo de flexión, especialmente cuando se trata de una sección esbelta.

Hasta 1965 se solía cuantificar esta resistencia por medio del ensayo de tensión indirecta, el cual consiste en aplicar un esfuerzo a compresión diametral sobre una probeta cilíndrica, desde ese entonces se ha profundizado en el estudio de esta propiedad y de las ventajas de esta, sin mencionar que el uso de nuevas metodologías para generar concretos con resistencias a tensión significativas (el uso de fibras al interior de las mezclas o los concretos de ultra altas prestaciones, con resistencias a la tensión superiores a los 17 MPa).

### **3.3.2.4- RESISTENCIA A LA FLEXIÓN**

El estudio de esta propiedad puede ser considerado de una prioridad secundaria o poca importancia en comparación al estudio de la resistencia a la compresión, sin embargo, esta propiedad adquiere mayor relevancia cuando se menciona que asimila el hecho de que todos los elementos estructurales elaborados en concreto sean sometidos a esfuerzos de flexión (ya sea debido a la aplicación de cargas horizontales como en las columnas o debido a las cargas verticales en el caso de las vigas, las cimentaciones, los pavimentos y losas).

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

Al estudiar esta propiedad se quiere observar el comportamiento de la matriz de concreto en estado sólido cuando una fracción de esta matriz presenta esfuerzos de deformación máxima, mientras otra fracción de la matriz se encuentra deformada parcial o totalmente debido a los esfuerzos de tensión. Aunque el ensayo de resistencia a compresión sea la prueba con la cual se cualifica la calidad del concreto para elementos estructurales, el ensayo de resistencia a la flexión es una herramienta útil para la investigación y la evaluación de los ingredientes de una matriz de concreto dentro de un laboratorio.

### **3.3.2.5- DENSIDAD**

Esta propiedad es relacionada con las cargas debidas al peso propio del material, en concretos convencionales esta propiedad está estrechamente relacionada con la capacidad de soportar esfuerzos a compresión, el volumen de aire y de agua incorporado en la mezcla y con estas dos últimas propiedades se puede cualificar la resistencia a agentes corrosivos externos.

En los concretos livianos esta propiedad, en compañía del esfuerzo a compresión, se utiliza para comparar la eficiencia que presenta este tipo de concreto, en función de los concretos convencionales, puede presentarse como una propiedad útil en la investigación y el estudio de nuevos materiales en una matriz de concreto dentro de un laboratorio.

### **3.3.3- FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO**

Dado que el concreto es el producto de la mezcla de diferentes materias primas, es susceptible a las condiciones en las cuales se encuentran dichas materias primas y a la preparación y disposición del mismo, a continuación, se presentan los factores más relevantes para la alteración del comportamiento del concreto.

#### **3.3.3.1- PRESENCIA DE LIMOS Y ARCILLAS EN LOS AGREGADOS**

La presencia de partículas tan finas como los limos y las arcillas dentro de una mezcla de concreto trae consigo modificaciones a la resistencia del material ante esfuerzos mecánicos y cargas debidas a la naturaleza, estas partículas se encuentran comúnmente en el agregado fino debido a la presencia de betas minerales de este material en los sitios de extracción del agregado.

Dichas partículas presentan cargas negativas residuales superficiales y al entrar en contacto con el agua, esta ingresa al espacio disponible entre las moléculas de arcilla, lo cual genera que estas se hinchen y ocupen un mayor volumen, se generan fuerzas de atracción molecular que retienen el agua y forman bicapas de arcilla (planos de debilidad en diferentes secciones del material), debido a la presencia de cationes libres y presiones capilares por parte del cemento y los demás agregados aumenta el consumo de agua necesaria para obtener una trabajabilidad deseada, lo cual desencadena en la disminución de la resistencia mecánica y el aumento de los cambios volumétricos, debido a la contracción por secado).

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

### **3.3.3.2- IONES PRESENTES EN EL AGUA DE MEZCLA Y CURADO**

La presencia de partículas ionizadas en el agua puede deberse a la presencia de sustancias altamente ionizadas en los puntos de almacenamiento o extracción del agua (como lo es el caso de las aguas subterráneas o las plantas de tratamiento de agua), las partículas ionizadas pueden presentarse en tal cantidad que limitan la mezcla homogénea debido a la presencia de cargas electromagnéticas similares e incluso en la modificación química de los materiales mezclados, generando una degradación del material o haciéndolo susceptible al contacto de agentes corrosivos.

### **3.3.3.3- CARBONATACIÓN**

Los elementos de concreto son ubicados por lo general en ambientes que fomentan su deterioro a través de un ataque químico. La carbonatación es un fenómeno natural que ha sido investigado y documentado a lo largo del siglo pasado, por lo general este fenómeno no genera un deterioro significativo en elementos de concreto que no contengan acero de refuerzo, sin embargo, en el concreto reforzado, este fenómeno puede presentarse una pequeña concentración de CO<sub>2</sub>, incluso la que normalmente se encuentra en la atmósfera (0.03 por ciento) y generar deterioros que son muy costosos de reparar.

Inicia con una evolución lenta y progresivamente desde la superficie expuesta del concreto hacia el interior del elemento, el acero de refuerzo es afectado por este fenómeno, causando la corrosión del acero, desencadenando en un deterioro de la sección transversal del elemento (perdida de área de concreto) y en una afectación en la resistencia del acero de refuerzo. Cuando el dióxido de carbono reacciona con la humedad al interior de los microporos del concreto, el hidróxido de calcio se transforma en carbonato de calcio, pasando de un ambiente con alto pH a uno que tiene un pH más neutral, el concreto posee un ambiente altamente alcalino (pH de 12 a 13) que protege al acero de refuerzo contra la corrosión (esta protección se logra con la formación de una capa de óxido pasivo sobre la superficie del acero, que permanece estable en un ambiente alcalino), Cuando la carbonatación progresa hacia la zona de refuerzo, la protección protege al acero de refuerzo deja de ser estable. A niveles de pH por debajo de 9.5 es posible que empiece la corrosión y el agrietamiento del concreto.

Los elementos de concreto que son más susceptibles a este fenómeno son aquellos que poseen una humedad relativa entre el 50 y el 60 por ciento, aquellos que posean una alta permeabilidad o un gran contenido de vacíos. una forma de aumentar la protección contra la carbonatación es el cumplimiento de prácticas estándar para producir concretos de baja permeabilidad: uso de bajas relaciones agua/cemento, compactación apropiada por vibración, uso de puzolanas como cenizas volantes o humo de sílice, y un curado del concreto apropiado.

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

### **3.3.3.4- PENETRACIÓN DE CLORUROS**

En condiciones tales como los ambientes ambiente marinos y costeros o aquellos donde la acción de sales de deshielo es esencial para el funcionamiento de la infraestructura, los cloruros pueden representar una gran amenaza en la integridad de los elementos de concreto. En presencia del oxígeno y de una suficiente cantidad de iones cloruros disueltos en el agua, los poros del hormigón se pueden convertir en vías que conectan la superficie expuesta de los elementos de concreto con el interior de los mismos y fomentan la corrosión de la armadura, incluso en condiciones de alcalinidad alta, otros de los posibles medios de transporte de iones de cloruro al interior de los elementos de concreto son la difusión electroquímica o la conexión o electrolítica entre las barras de refuerzo que actúan como un conductor eléctrico y el agua en los poros de la pasta actuará como electrolito.

La acción de los iones de cloruro genera una descomposición de la capa de óxido pasivo y genera un incremento en diámetro de las varillas (hidróxido de hierro y cloruro de hierro) causan por sí mismas agrietamiento en el recubrimiento del concreto, lo que facilita en gran medida el acceso de humedad, aire y cloruros contenidos en el agua, y acelera así el proceso de ataque, llevando las estructuras a daños irreversibles en periodos notablemente cortos.

### **3.3.3.5- PENETRACIÓN DE SULFATOS**

Los sulfatos pueden desarrollarse de manera natural en los suelos expuestos a aguas subterráneas, a cuencas hídricas con contenido de hierro, a efluentes industriales, así como cuencas marítimas. El deterioro de los elementos en concreto, por la penetración de sulfatos, se debe a la reacción que desencadena la mezcla de sulfatos que se encuentran en el ambiente con los sulfatos que están presentes en el cemento y forman la etringita (cristales en forma de agujas formados durante las primeras etapas de formación del cemento).

El ataque se presenta cuando, a través del agua, altas concentraciones de sulfatos entran en contacto con los compuestos hidratados de la pasta de cemento. Este contacto hace que se produzca una reacción química que genera expansión en la pasta, reacción del sulfato con hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento formando sulfatos de calcio (yeso) o a la reacción de sulfato de calcio con el aluminato de calcio hidratado formando sulfato aluminato de calcio (etringita), que genera un aumento de presión en los poros del concreto capaz de desintegrar el concreto.

### **3.3.4- CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS PARA EL DISEÑO DE CONCRETO**

El concreto es un material heterogéneo elaborado artificialmente a través de la mezcla, en determinadas proporciones, de una pasta compuesta por cemento y agua y agregados pétreos (elementos conformados principalmente por sílice). Al endurecerse la pasta, una a los agregados pétreos, se genera un conglomerado semejante a una roca debido a la reacción química entre estos componentes. Gran parte de las características del concreto, en estado plástico (fresco) y endurecido, depende de las características del agregado, son la disponibilidad y las características

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

de cierto tipo de agregado los parámetros que pueden modificar la calidad y el precio de una mezcla de concreto.

Para lograr mejorar las propiedades mecánicas del concreto, se debe contar con un esqueleto pétreo (que usualmente representa entre el 70% y 80% del volumen del material) empacado lo más densamente posible, y con la cantidad de pasta de cemento necesaria para llenar los huecos que éste deje (Palbol 1996).

Las principales características los agregados que afectan las propiedades del concreto son mineralogía gradación, forma y textura, absorción, módulo de elasticidad, resistencia al ataque de sulfatos y dureza. Cada propiedad tiene un efecto significativo en el comportamiento del concreto en estado fresco y endurecido y puede presentarse una influencia de estas propiedades en el momento de realizar el diseño o el avalúo económico del concreto. A continuación, se expondrán las características principales de los agregados pétreos de origen natural y se excluirán las características de los agregados reciclados o no pétreos, ya que histórica y culturalmente los agregados de origen natural han hecho parte de la elaboración del concreto, el uso de otros elementos se evaluará en comparación al comportamiento y a las características de estos agregados.

### 3.3.4.1- PROCEDENCIA GEOLÓGICA

Los concretos convencionales que se elaboran en Colombia y en gran parte del mundo utilizan agregados que pueden ser obtenidos en depósitos de origen natural (ríos, playas, entre otros.) y en canteras como productos de la trituración de rocas. Todas estas partículas tienen su origen de una masa mayor, formada millones de años atrás por procesos internos y externos de la tierra que hacen parte del ciclo geológico de la tierra, que está en permanente movimiento. Gran parte de las características de los agregados proceden del origen y la formación de la roca madre, los diferentes fenómenos geológicos generan diversos tipos de rocas, que se clasifican comúnmente en:

Rocas ígneas: la mayor parte de la corteza terrestre está conformada por este tipo de rocas, los procesos internos de la tierra provocan la generación y movimiento constante del magma, al enfriarse se transforma en este tipo de roca que también es conocida como rocas magmáticas, endógenas u originales (ya que los demás tipos de rocas proceden de ella). La velocidad de enfriamiento es proporcional a la dimensión de cristales de roca que se forman y a la densidad que esta roca puede presentar.

Rocas sedimentarias: son elaboradas por procesos de meteorización (descomposición de minerales y rocas cuando entran en contacto con la atmósfera), son el tipo de roca más abundante en la superficie terrestre. Debido a procesos de roción, transporte y consolidación estas rocas presentan una forma semi redondeada y lisa en la mayoría de su integridad física, generalmente son de tamaño pequeño y se les conoce como grava o piedras de río.

Rocas metamórficas: este grupo de rocas se origina de la modificación en presión y temperatura de rocas ígneas y metamórficas, estos aumentos de presión y temperatura generan una transformación iónica que genera alargamiento y adelgazamiento de los cristales de roca o una reagrupación de los cristales de roca que genera una roca más densa en su estructura.



## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

Es importante considerar la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento endurecida que lo rodea (en la zona de interfase cemento-agregado la adhesión entre partículas de cemento no es tan estrecha con las partículas de cemento endurecida más alejada de las partículas del agregado relativamente grandes del agregado, en consecuencia, la pasta de cemento endurecida en la zona de interfase tiene una porosidad mucho mayor que en el resto de la matriz), como dato de comparación, en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), el cálculo del módulo de elasticidad puede realizarse en función del tipo de agregado grueso utilizado para la mezcla de concreto, siendo el agregado de origen ígneo el elemento que genera un mayor incremento en el módulo de elasticidad, y siendo el agregado de origen sedimentario el elemento que genera el más bajo módulo de elasticidad.

### **3.3.4.2- GRANULOMETRÍA**

Desde el punto de vista de su tamaño, las partículas áridas o agregados pétreos que son utilizadas en la creación del concreto se clasifican en partículas gruesas y finas (denominadas coloquialmente grava y arena, respectivamente), sin embargo, estos términos son acuñados para agrupar a todos los tipos de partículas que están dentro de una gama de tamaños (las partículas que no están dentro de esta gama de tamaños se agrupan dentro de otros términos), en este caso estudiaremos los tipos de partículas utilizados en las mezclas de concreto.

Los agregados utilizados en el concreto se dividen en dos grupos: los agregados finos y los agregados gruesos. Los primeros consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que van desde 5 mm hasta mayores de 60  $\mu$ m; los segundos son aquellos cuyas partículas son mayores a 5 mm y hasta 125 mm (Neville 1999).

La granulometría es el estudio estadístico de la distribución de tamaños de una colección de partículas. Tiene como fin determinar la distribución del tamaño de las que componen el esqueleto pétreo, esta se representa en forma de tablas o gráficos, una distribución homogénea en el tamaño de los agregados garantiza una disminución en la porosidad del concreto y un aumento en la resistencia del material, en comparación a una mezcla de concreto con distribución no homogénea.

Al estudiar las partículas gruesas, es importante mencionar el tamaño máximo del agregado (TMA), propiedad relacionada con la trabajabilidad, la economía y la durabilidad del concreto. Cuando los agregados son muy gruesos pueden producir mezclas rígidas, con un bajo asentamiento, también pueden generar dificultades relacionadas con la disposición del concreto fresco y la resistencia del elemento cuando este tamaño supera la separación entre los refuerzos de acero.

En el agregado fino hay dos elementos que deben ser considerados, por un lado, el módulo de finura (MF) y la continuidad en los tamaños y por el otro la presencia de limos y arcillas. el módulo de finura es un índice que sirve para clasificar los agregados pétreos en función de su granulometría, se calcula como la suma de los porcentajes de agregados retenidos acumulados de una serie de tamices, dividido por 100, el MF indica cuando existe una alta presencia de agregado grueso o

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

agregado fino, ambos casos muy perjudiciales para el diseño de concreto (puede involucrar el aumento de vacíos en el concreto o una disminución en la resistencia con concreto endurecido, respectivamente).

Con respecto al módulo de finura y la distribución de tamaños en el agregado grueso y fino, existen normativas como la ATM C 33 en donde se estandariza una distribución en el tamaño de los agregados, para que no se genere una disminución en la calidad del concreto.

### **3.3.4.3- FORMA Y TEXTURA SUPERFICIAL**

Se ha mencionado con anterioridad como la presencia del aire en forma de vacíos ala interior del concreto implica una disminución en la resistencia mecánica de los elementos del concreto y en la durabilidad del elemento constructivo debido a la desintegración del material. Para optimizar el comportamiento del concreto se requieren disminuir el número de vacíos presentes en las mezclas de concreto, en topología, la compacidad hace referencia a un espacio compacto (conformado por distintas partículas) que tiene propiedades similares a las de un conjunto finito (perfectamente sólido y compacto).

La compacidad de una mezcla de concreto y depende de 3 parámetros fundamentales: tamaño y distribución de los granos, forma de los granos (morfología y textura) y método de compactación de la mezcla de concreto. (Andersen y Johansen, 1991).

La mayoría de los estudios se han dedicado a comprobar cuál es el agregado más recomendado para la fabricación del concreto, en función de los requerimientos de pasta de cemento para unir los agregados, la trabajabilidad del concreto en estado fresco y la incidencia que pueden tener en la resistencia. Se ha concluido que partículas planas y alargadas requieren un mayor contenido de cemento, generan un mayor volumen de vacíos, producen dificultades en el acabado superficial y dificultan la exudación. Aunque hay diferentes opiniones acerca de qué forma de los agregados gruesos genera mejor resistencia, se ha llegado al consenso de que las partículas semiesféricas y lisas tienen mejor trabajabilidad y requieren un menor contenido de pasta de cemento para unir los agregados, en cambio, los agregados gruesos angulares dificultan el acabado superficial del concreto e incrementan la demanda de agua, y así mismo arena y pasta de cemento para proporcionar un concreto trabajable, a costa de reducir la resistencia y la durabilidad.

Debido al incremento del volumen del cemento y a la forma en que al expandirse puede introducir las partículas de agregado fino (tratadas comúnmente como semiesféricas y lisas), la forma o textura de las mismas no relevante para el análisis del comportamiento. Sin embargo, existen investigaciones que indican como la forma de la partícula y la textura superficial del agregado fino puede tener una influencia más importante sobre la resistencia del hormigón que la del agregado grueso.

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

### **3.3.4.4- ABSORCIÓN**

Anteriormente se mencionó como el incremento de agua en las mezclas de concreto puede afectar la resistencia del concreto, sin embargo, hay un factor de estudio muy importante a tener en cuenta es la absorción de agua causada por la presencia de los agregados. Hay que comenzar por explicar cómo estructura interna de una partícula de agregado se constituye de materia sólida y vacíos que pueden o no contener agua, la presencia de porosidades en el exterior y el interior de los agregados, como ya se mencionó anteriormente, se debe a la velocidad de conformación de la roca madre al pasar de magma a estado sólido.

El agua puede entrar en contacto con los agregados (antes del proceso de mezclado con el cemento), por diferentes razones, las de agua que puede haber al interior de los agregados se puede definir como:

- Secado al horno – totalmente absorbente
- Secado al aire – la superficie de las partículas está seca, pero su interior contiene humedad y, por lo tanto, aún es ligeramente absorbente
- Saturado con superficie seca (SSS) – no absorben ni ceden agua al concreto
- Húmedos – Contiene un exceso de humedad sobre la superficie (agua libre)

Conocer la cantidad de agua que pueden alojar los agregados resulta de mucha utilidad para realizar correcciones en el diseño de mezcla y se emplear en ocasiones como un valor para aceptar o rechazar el agregado de un cierto tipo o para una cierta aplicación. Anteriormente se mencionó la importancia de poseer arcillas o limos dentro de los agregados finos, debido a su tamaño y composición electroquímica, estas partículas son susceptibles de absorber gran cantidad de agua y de expandirse durante el proceso, la presencia de estas partículas no solo modifica el volumen de agua requerido, sino además implicarán un aumento en el volumen de vacíos una vez en la mezcla inicie el proceso de exudación, en el que la partícula disminuirá su volumen.

### **3.3.4.5- DENSIDAD Y MODULO DE ELASTICIDAD**

Tanto la densidad como el módulo elástico del concreto directamente del valor de estas mismas propiedades en los agregados gruesos y finos, a su vez, estas propiedades dependen de la roca original. Existe la necesidad de definir cuidadosamente el término estos parámetros, especialmente la densidad, ya que en las partículas hay cavidades o poros que pueden estar vacíos, parcialmente saturado o llenos de agua, dependiendo de su permeabilidad interna. Por lo general, el valor de esta densidad en los agregados pétreos oscila entre  $2.30 \text{ g/cm}^3$  y  $2.8 \text{ g/cm}^3$  según la roca de origen.

### **3.3.4.6- DURABILIDAD Y RESISTENCIA**

Aunque por lo general la durabilidad de los agregados no suele ser una característica a considerar, sin embargo, los agregados pétreos son susceptibles a los mismos fenómenos que afectan el comportamiento del concreto en estado seco: iones presentes en el agua de mezcla y curado,

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

permeabilidad, carbonatación, penetración de cloruros y sulfatos. Además, debe evaluarse la resistencia que deben tener los agregados a cargas mecánicas que pueden desintegrar las partículas.

Ya que el componente químico principal de los agregados es la sílice, la carbonatación no representa el mayor peligro de los agregados (sin embargo, puede haber presencia de calcio en los agregados). Al igual que el concreto, los agregados tienden a ser porosos y a presentar vacíos en su interior, la penetración de iones corrosivos sigue siendo considerable, los cloruros y los sulfatos no se presentan en esta ocasión como agentes capaces de crear una capa corrosiva en hierro sino como agentes capaces de desintegrar o afectar el comportamiento de los agregados. El índice de durabilidad es un valor que muestra la resistencia relativa de un agregado a producir finos dañinos (partículas del tamaño de los limos o arcillas) cuando se somete a los métodos de degradación mecánica o abrasión. Este índice da una noción de la resistencia que poseen los agregados a cargas de transporte, deposición del material y la resistencia que puede tener el concreto a cargas abrasivas como las que puede sufrir un concreto al contacto permanente de una superficie líquida.

### **4- ESTADO DEL ARTE**

El uso industrializado del concreto en el último siglo, ha provocado una gran explotación de recursos naturales no renovables, tan solo la producción del cemento portland genera, en peso, un equivalente de CO<sub>2</sub> liberado a la atmósfera, entidades de protección ambiental en diferentes partes del mundo ya están controlando los sitios de explotación de los materiales pétreos y el volumen de material que pueden retirar.

Aparte del gran impacto ambiental, desde el punto de vista económico la producción de este material (acompañado de las varias y cambiantes normas ambientales) reproducción. En vista de lo anterior, muchos países han empezado a investigar modelos de producción que reduzcan los costos de producción, limitando el impacto ambiental. La producción de cementos adicionados es un ejemplo tal como la producción de cemento portland puede disminuir sin afectar la producción del polvo de cemento y sin disminuir la calidad y durabilidad del material, otro ejemplo es el empaquetamiento de residuos de producción en el concreto, Debido a la aumento en el control de las normas de extracción de los agregados comúnmente usados para la elaboración del concreto, se ha comenzado a reemplazar agregados pétreos por materiales que, al involucrarse en una mezcla de concreto, mantengan un comportamiento similar al de los concretos elaborados con los agregados pétreos, el uso escoria de hierro, arcillas termo expandidas, Llantas de caucho desechadas y residuos de construcción y demolición Son materiales que han demostrado su capacidad Para hacer embebidos en el concreto y no afectar las propiedades de resistencia y durabilidad.

A continuación, se presentará El estado del arte conformado por investigaciones en los cuales se han utilizado los termoplásticos como reemplazo del agregado, especialmente el agregado fino en la elaboración de concretos.

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

### **4.1-PROCESOS DE INVESTIGACIÓN Y EJECUCIÓN**

ESTADO DEL ARTE DE LA INCIDENCIA DE LOS POLÍMEROS EN EL DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO. ESTUDIO A NIVEL MUNDIAL: En 2014 los estudiantes de ingeniería civil de la universidad católica de Colombia Ismael Antonio Cerón Cuevas y Carlos Uriel Milaguy Gil realizan una recopilación sobre las investigaciones más relevantes sobre el estudio de los polímeros y su incidencia en el concretos, realizadas en Europa, Norteamérica y Latinoamérica. De esta investigación se concluyó que:

- El 87% de las investigaciones se enfocan en el estudio de polímeros sintéticos.
- La mayoría de las investigaciones resaltan como principal desventaja el alto costo y en algunos casos el aumento de la deformación por aumento de temperatura (caso de fibras naturales).
- Las propiedades mecánicas, como la resistencia a compresión y tensión mejoran significativamente en la mayoría de los ensayos (caso de fibras sintéticas).
- La adición de polímeros a base de plástico al concreto disminuye las propiedades mecánicas de las mezclas sin afectar significativamente sus demás propiedades.

INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS PLÁSTICOS RECICLADOS EN LAS PROPIEDADES ENDURECIDAS DE LOS CONCRETOS: El arquitecto Eduardo Hernández, Jefe de Soporte Técnico Nacional y Operaciones CTCC CEMEX y profesor de la Facultad de Arquitectura Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, emprendió una investigación para utilizar PEAD reciclado en lugar de gravilla en los concretos arquitectónicos. Al incorporar plásticos a mezclas se obtuvo una mayor conductividad y difusividad térmicas; esto significa que no capta el calor, sino que lo disipa, sin embargo, se presentó una reducción de sus factores de resistencia (compresión, flexo-tracción y tensión). No obstante, se obtuvieron con los valores de resistencia aceptables.

UTILIZACIÓN DE MATERIALES PLÁSTICOS DE RECICLAJE COMO ADICIÓN EN LA ELABORACION DE CONCRETO EN LA CIUDAD DE NUEVO CHIMBOTE: En 2014 los estudiantes de ingeniería civil de UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA, Perú, Michael Anthony Léctor Lafitte y Edson Jesús Villarreal Barragán realizaron ensayos mecánicos y de comportamiento a mezclas de concreto en las que usaron partículas de polietileno (PET) con tamaño nominal de 1/2", se realizaron mezclas en las cuales se remplazaba un 0%, 5%, 10% y 15% del agregado pétreo por agregado plástico. De esta investigación se concluyó que:

- La adición de material plástico reciclado (PET) no llegaron a mejorar las propiedades físico-mecánicas de una mezcla convencional.
- El manejo del diseño de las mezclas disminuye con la adición de materiales de reciclaje.
- Se presento una disminución en las densidades del concreto disminuye conforme el porcentaje de agregado plástico aumentaba, se presentaron disminuciones de entre 5% y 13 %, esta disminución no es directamente proporcional al porcentaje de agregado plástico usado como remplazo del agregado fino.
- Se presentó una reducción de resistencia a compresión en tanto aumentaba el porcentaje de plástico, ninguno de los porcentajes utilizados en las mezclas de concreto genero resultados aceptables de resistencia a los 28 días.

APLICACIÓN DE MATERIALES POTENCIALMENTE RECICLABLES EN LA CONSTRUCCIÓN DE VIS: En 2007 los ingenieros civiles Fernando Acevedo Matos y Elías Majana Acosta realizaron esta investigación para aplicar al título de magister en ingeniería en el área de ingeniería y gerencia de la construcción de la universidad de los andes. Estudiaron la aplicación de polímeros termoplásticos

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

como material sustituto de insumos para la construcción de viviendas de interés social (VIS). De esta investigación se concluyó que:

- Los costos de producción de mezclas con materiales plásticos, en comparación al sistema tradicional, son superiores debido a que se requiere una importante inversión en insumos para transformar el material plástico para la creación de mezclas.
- Los materiales termoplásticos presentan propiedades estructurales y se presentan en cantidades suficientes, incluso hablando solo del material de desecho, para utilizarse en mezclas de concreto.
- El uso de estos materiales no afecta de manera significativa la manejabilidad ni la apariencia del elemento de concreto con acabado a la vista.

VALORACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE CONCRETO ADICIONADO CON RESIDUOS DE LLANTAS DE CAUCHO: En 2007 el ingeniero civil Hermes Andrés Torres Ospina realizó esta investigación para aplicar al título de magister en Ingeniería Civil con énfasis en estructuras. Valoro de algunas de las propiedades mecánicas y de durabilidad de mezclas de concreto con reemplazo parcial de agregado fino, por residuos de llantas, los porcentajes de reemplazo de residuos de llantas fueron, 0% 10 %, 20% y 30 %. De esta investigación se concluyó que:

- las propiedades mecánicas y de durabilidad se vieron afectadas por el uso de caucho como reemplazo parcial de arena, presentando una reducción de valores frente a los presentados por la muestra sin sustitución de caucho.
- Los concretos con mayores pérdidas en la resistencia a la compresión son los que contienen altos porcentajes de sustitución de caucho. Sin embargo, la resistencia a la compresión con 10 % y 20 % de adición caucho presentaron resultados similares a largo plazo.
- El módulo de elasticidad del concreto se ve levemente reducido por la incorporación de residuo de caucho con 10 % y 20 %, con respecto a la muestra con 0% de agregado de caucho.
- La manejabilidad de los concretos para todos los porcentajes de adición de caucho fue normal, permitiendo un buen mezclado, producción de especímenes y extracción de camisas; los asentamientos inmediatos medidos fueron similares a lo especificado inicialmente.
- Los resultados de resistencia a flexión a 28 días presentaron reducción en sus valores con el aumento de porcentaje de adición de grano de caucho

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR: En 2007 el ingeniero civil Francisco Javier Zuluaga Molina realizó esta investigación para aplicar al título de especialista de estructuras. Evaluar el comportamiento del concreto elaborado con desechos de icopor (partículas de entre 1 mm y 10 mm)., los porcentajes de reemplazo de residuos de llantas fueron, 0% 10 % y 20%. De esta investigación se concluyó que:

- El reciclaje de este tipo de materiales permite disminuir el volumen de vertidos en los rellenos sanitarios urbanos y a futuro abaratará la elaboración de nuevos productos.
- Las mezclas elaboradas presentaron buena manejabilidad y un valor de asentamiento dentro del rango de concreto en condiciones normales (entre 5 y 10 cm).
- El icopor molido incorporado a las mezclas dificultó la elaboración del concreto.
- Al aumentar el porcentaje de reemplazo con icopor, las mezclas evidenciaron menor peso unitario (más livianas); no obstante, de acuerdo a la Nota 7 de la norma INV E-410-07, estos concretos elaborados son de peso normal.

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

- El cálculo del módulo de elasticidad de cada mezcla evidenció que los valores tanto de esfuerzo como de deformación unitaria se encuentran cercanos entre mezclas de concreto y las diferencias no son significativas.
- Las muestras a 10% y 20% de reemplazo de icopor registraron menor módulo de rotura que la muestra patrón (0% de reemplazo).
- Las diferencias encontradas entre mezclas no son significativas y por tanto se concluye, a partir de estos resultados, que concretos elaborados con incluso 20% de reemplazo con icopor presentan una resistencia a la compresión similar que concretos tradicionales sin reemplazo alguno.

### **5- PROGRAMA EXPERIMENTAL**

A continuación, se expondrán los parámetros más relevantes para la investigación: se describirá el material plástico a utilizar, se explicarán las características de diseño para la mezcla de concreto y se establecerá un proceso a seguir para la elaboración de ensayos mecánicos.

#### **5.1- DISEÑO DE MEZCLAS**

Para el desarrollo de la investigación se utilizó una resistencia a la compresión de 21 MPa (3000 psi) aproximadamente, se utilizaron los parámetros de diseño otorgados por el ACI 211 en el cual se obtiene una dosificación de materiales en peso (en función de las necesidades de diseño y la densidad de los materiales), las modificaciones para el agregado fino en las mezclas de concreto se dosificaron con base en su volumen, esto debido a la diferencia entre densidades de la arena y el plástico triturado, el resto de los componentes se dosificaron en peso, de acuerdo a los resultados del diseño de mezcla realizado, evitando errores al no tenerse en cuenta el grado de compactación de las partículas, grado de saturación o humedad de los agregados.

A continuación, se presenta cada uno de estos pasos, en base a las recomendaciones realizadas por el ingeniero Pedro Nel Quiroga, las cuales se tuvieron en cuenta para el diseño de la mezcla del presente estudio:

- a. Tamaño máximo de agregados: en relación con este parámetro, se tiene en cuenta la dualidad sobre el contenido de agua-cemento y el contenido de agregado, la disponibilidad del material, el precio de los materiales y las características geométricas y condiciones de refuerzo de la estructura, el tamaño máximo del agregado oscila entre 3/8" y 3". Con base a estas consideraciones, se toma escoge el tamaño máximo promedio de agregado de 3/4", siendo aceptable una diferencia de 1/4".
- b. Contenido de aire: el contenido de aire en la mezcla de obtuvo con las tablas del código ACI 211, en el cual está en función del tamaño máximo de agregados, atrapado naturalmente y debido a la exposición al ambiente. en base a lo anterior, se adopta un contenido de aire del 2%.
- c. Asentamiento: para definir este parámetro, se suelen tener algunas consideraciones previas: la cantidad y espaciamiento del acero de refuerzo, el tamaño de la sección transversal del

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

elemento que se va a construir, las condiciones de colocación del concreto y si este incluye un sistema de compactación o vibrado. De acuerdo a lo presentado en el código ACI 211, una mezcla con asentamiento de entre 3" y 4" presenta una consistencia media, capas de utilizarse en elementos como pavimentos, losas, muros y vigas, dispuestos de forma manual.

- d. Agua de mezclado: el agua se encarga de hidratar las partículas de cemento y produce la fluidez necesaria para la mezcla de concreto. En la guía ACI 211 la cantidad de agua depende del tamaño máximo nominal del agregado y el asentamiento de diseño. De acuerdo a la tabla presentada por el código ACI, el contenido de agua necesario sería de 205 L/m<sup>3</sup>, pero se trabaja con 200 L/m<sup>3</sup>.
- e. Relación Agua/Cemento: la resistencia del concreto depende de la hidratación del cemento, los agregados y la interface de adherencia cemento - agregado. Diferentes agregados y cementos, ofrecen resistencias distintas en función de la relación agua/cemento. Se trabaja con una relación Agua/Cemento de 0.5, a recomendación del ingeniero Pedro Nel Quiroga.
- f. Contenido de cemento: se calcula en función al contenido de agua con la relación agua/cemento, se trabaja con contenido de cemento de 400 kg/m<sup>3</sup>
- g. Peso del agregado grueso: el peso del agregado grueso se obtuvo con las tablas del código ACI 211, en la cual este valor se obtiene en función del tamaño máximo de agregados y el volumen del agregado grueso seco y compactado por unidad de volumen de concreto para diversos módulos de fineza del agregado fino (b/bo), con base a la tabla del código ACI 211, se trabaja con un peso del agregado grueso de 1100 Kg/m<sup>3</sup>.
- h. Peso del agregado fino: para definir el valor del peso del agregado fino, se calcula mediante la diferencia de los volúmenes absolutos de los materiales previamente calculados (aire, gua, cemento y agregado grueso), obtenidos con las densidades supuestas para cada material, se trabaja con un volumen del agregado fino de 0.19 m<sup>3</sup> por m<sup>3</sup> de concreto.

Se presenta a continuación los resultados obtenidos bajo los parámetros de diseño calculados con el código ACI 211.

PROPORCIONES DE MEZCLA 1	
aire (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.02
agua (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.2
cemento (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.14
agregado grueso (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.45
agregado fino (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.19
agregado plástico (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.00
m <sup>3</sup> requeridos	0.06
<i>agua (L)</i>	12.0
<i>cemento (Kg)</i>	24.0

Tabla 1. proporciones para mezcla de prueba



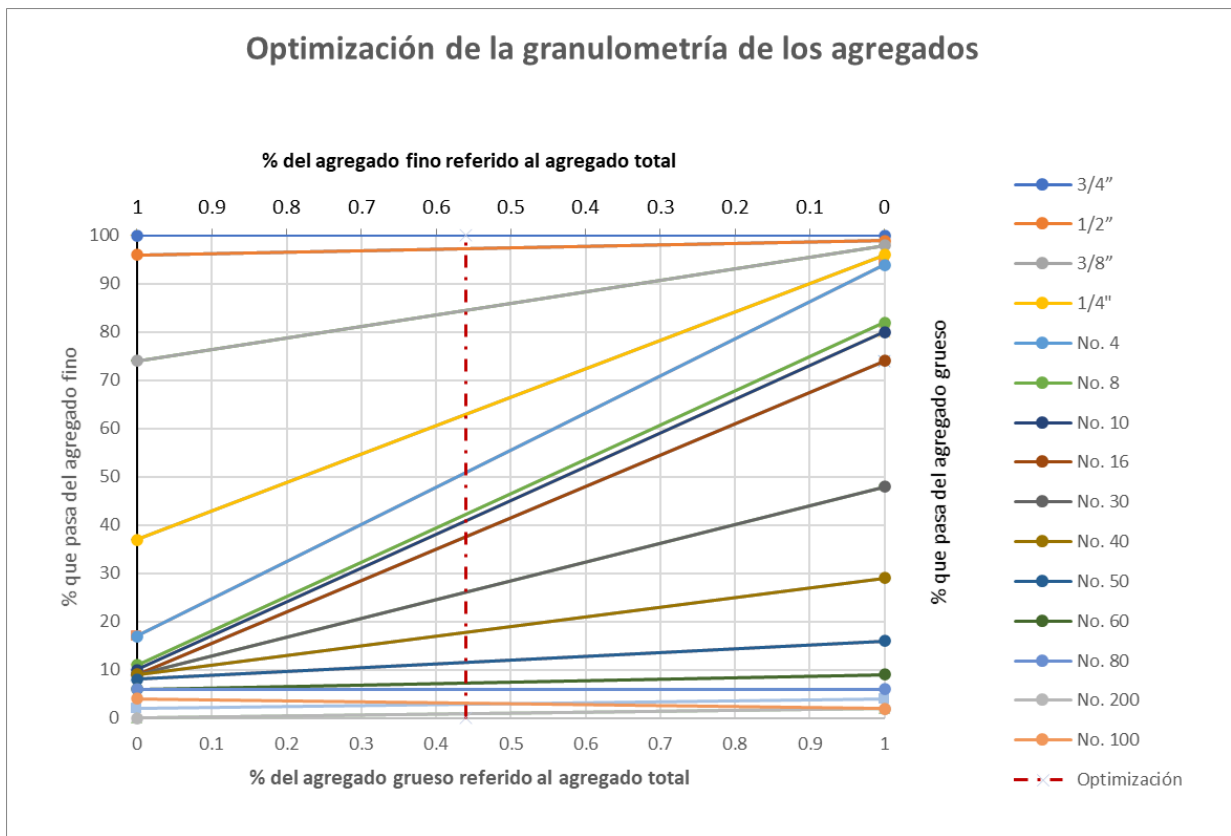
## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

Con base a estas cantidades se realizó una mezcla de prueba para evaluar el comportamiento de la dosificación diseñada.

### 5.2- CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Se realizó una mezcla de prueba con la finalidad de evaluar el comportamiento de la mezcla y los resultados que presentaría ante los ensayos de compresión. Al momento de realizar la mezcla se presenta un buen comportamiento por parte del material y presento para la prueba de asentamiento un resultado que se encuentra entre los valores esperados, lamentablemente, algunos de los cilindros presentaron una descomposición dentro de la piscina de curado y presento resultados irregulares en los ensayos de compresión. Debido a la los malos resultados presentados en la mezcla de prueba, se decide hacer una optimización de la granulometría de los agregados, para determinar la proporción adecuada de cada agregado dentro de la mezcla. Para esto se utilizó el método gráfico de Fuller-Thomson.

Se procede a realizar el proceso de tamizado utilizando los agregados y los tamices facilitados por el Laboratorio de Estructuras, los cuales presentaban las siguientes características:



Grafica 1. Optimización de los agregados por el método gráfico de Fuller-Thomson.

De acuerdo con la anterior gráfica, el porcentaje óptimo de arena es 56% y de grava 44%.

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

En base a lo anterior, el resumen del diseño queda así:

$f'_c$ (Mpa)	resistencia especifica=	21 Mpa
A [In]	asentamiento =	3"- 4"
Aire [%]:	contenido de aire naturalmente incorporado =	2%
TMN [In]	tamaño máximo agregados=	1" 1/2
TMN [In]	tamaño máximo nominal agregados=	1"
Agua [kg/m3]:	contenido de agua (por m3 de concreto) =	200
A/C:	relación agua / cemento =	0.5
C [kg/m3]:	contenido de cemento =	400
Vaire [m3 /m3]:	volumen de aire =	0.02
Vagua [m3 /m3]:	volumen de agua =	0.2
Vcemento[m3 /m3]:	volumen de cemento =	0.14
Vagregados [m3 /m3]:	volumen de agregados =	0.64
%arena-opt	porcentaje de arena óptima =	56%
%grava-opt	porcentaje de grava óptima =	44%
Gagua [kg/m3]:	peso aparente promedio agua =	1000
Gcemento [kg/m3]:	peso aparente promedio cemento =	2860
Gagregados [kg/m3]:	peso aparente promedio agregados =	2240
Pagua [kg/m3]:	<b>peso agua =</b>	200
Pcemento [kg]:	<b>peso cemento =</b>	400
Pagregados [kg]:	<b>pesos agregados =</b>	1434
Pgarava [kg]:	<b>peso grava =</b>	803
Parena [kg]:	<b>peso arena =</b>	631

Tabla 2. proporciones para mezcla de diseño adoptado

Con base a los objetivos planteados en el proyecto, se establecieron dos materiales termoplásticos con características y comportamientos mecánicos diferentes, con la ayuda de empresarios de la industria de la recolección de residuos y el reciclaje de plástico se logró obtener un material que ha sufrido un proceso de limpieza y trituración, proceso común en la industria de paletizado y disposición de materiales, por lo cual se contaba con un material triturado (de forma angular), de tamaños similares a los de la arena y libre de las impurezas que podían poseer por su uso original. Los termoplásticos que se utilizaron son:

- Polietileno (PET): este material fue obtenido de botellas de agua y otros contenedores realizados en este material, ara la presente investigación se le llamara Material 1.
- Polietileno de alta densidad (PEAD): este material fue obtenido de elementos como carcas de computadores antiguo y canecas de basura, para la presente investigación se le llamara Material 2.

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**



*Imagen 2. Material 1 triturado*



*Imagen 3. Material 2 triturado*

Con base a los materiales termoplásticos mencionados anteriormente, se realizarán cuatro mezclas de concreto: la Mezcla1 no contendrá ningún material termoplástico y servirá como referencia y punto de comparación con respecto a las demás muestras, las Mezcla2 y 3 se realizarán cada una con un único material termoplástico (diferente para cada mezcla), y la Mezcla4 presentará se realizará usando el Material 1 y Material 2 en partes iguales.

Mezcla	Material termoplástico		
	Material utilizado	% de material a utilizar	
		Material 1	Material 2
1	Ninguno	0%	0%
2	Material 1	100%	0%
3	Material 2	0%	100%
4	Material 1 y 2	50%	50%

*Tabla 3. Proporciones material termoplástico incluido para cada mezcla realizada*

Diferentes autores e investigaciones consultadas concuerdan en el tema referente al porcentaje de volumen de agregado fino que puede remplazarse por material termoplástico, esto aplicado en a mezclas de concreto convencional que no superan esfuerzos de compresión  $f'_c = 28$  MPa, es posible remplazar un 10% del volumen total del sin afectar de manera significativa las propiedades del concreto (asentamiento, durabilidad, resistencia a compresión y flexión), así mismo, con porcentajes de remplazo de 15%-25% se considerarían muy afectadas las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas de concreto. La explicación de porque un porcentaje de remplazo

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

superior al 15% no es apropiado para las mezclas de concreto radica en las propiedades mecánicas del material mismo: aunque anteriormente se ha hablado de manera lisonja de las propiedades mecánicas y de la durabilidad de estos materiales, los materiales no presentan punto de comparación con respecto a materiales como la escoria de alto horno, puzolanas o los Residuos de Construcción y Demolición – RCD, sucede de manera similar con los agregados silíceos naturales. Un elevado porcentaje de remplazo de agregado fino por material termoplástico conlleva una mayor distribución de material termoplástico al interior de las mezclas de concreto, lo cual puede producir planos de falla o acumulación de material de baja resistencia en una o varias zonas al interior de los elementos de concreto

Sin embargo, dado que uno de los objetivos principales de esta investigación radica en conocer el comportamiento de los termoplásticos en una mezcla de concreto y como es el comportamiento de este material a nivel estructural al interior de una mezcla de concreto, se escogió remplazar un 25% del volumen total de agregado fino por material termoplástico. Con el porcentaje seleccionado se tiene la finalidad de evaluar:

1. Como una mezcla de concreto diseñada para  $f'_c = 21$  Mpa es afectada con un remplazo del 25% del volumen de agregado fino por uno de los termoplásticos evaluados (Material 1 y Material 2). Se asume que, con este porcentaje de remplazo, tanto en la Mezcla 2 como en la Mezcla 3 habrá una disminución en los resultados mecánicos (con respecto a la Mezcla 1), esto debido a la elevada distribución de material termoplástico en la matriz de concreto.
- 2.Cuál de los materiales evaluados genera una menor disminución de las propiedades de mecánicas y de durabilidad en la mezcla de concreto (comparación realizada con respecto a la Mezcla 1). Se supone una obtención de resultados significativamente diferentes (hipótesis basada en la diferencia entre las propiedades mecánicas y de durabilidad de los materiales termoplásticos evaluados en la Mezcla 2 y la Mezcla 3).
3. Como la presencia de dos materiales termoplásticos diferentes afectan el comportamiento de una mezcla de concreto (comparación realizada con respecto a la Mezcla 1, la Mezcla 2 y la Mezcla 3). Se supone que la presencia del Material 1 y el Material 2 en la misma mezcla generara una afectación en el comportamiento de las propiedades mecánicas y de durabilidad, con respecto a la Mezcla 1, pero generara un mejor comportamiento con respecto a la Mezcla 2 o la Mezcla 3 (de estas dos últimas, la que presente el peor comportamiento con respecto a la Mezcla 1).

### **5.3- MODELACIÓN DE HIPÓTESIS Y DESARROLLO DE LOS ENSAYOS**

Con base en los objetivos planteados en el proyecto y a las características mencionadas anteriormente, se describe a continuación la metodología planteada para el desarrollo experimental de la investigación:

Realizar un acercamiento a diferentes empresas productoras, recolectoras y recicladoras de plástico, dedicadas al acopio, trituración y reciclaje de plástico, con el fin de buscar el material plástico que fuera más apropiado para la investigación (durante estas interacciones se busca un material que presentara la mayor homogeneidad en su origen y en su proceso de trituración, así

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

como un tamaño lo más cercano al agregado fino). Gracias a la resolución 1407 del 26 de 2018, resolución que reglamentar la gestión ambiental de residuos de envases y empaques de plástico e ínsita a las empresas que trabajan con este material a fomentar investigaciones y procesos que permitan disponer de los residuos plásticos de forma eficiente y amigable con el ambiente, se puede obtener el material con las características necesarias, sin requerir la inversión de capital.

Obtenida una muestra de material plástico apropiado para la elaboración de mezclas, se realizará un ensayo de granulometría por tamizado para conocer las propiedades de finura del material y una mezcla prueba para poder ensayar una fracción del material plástico, con base a los resultados de estas mezclas, se escogerá el material más apropiado para la investigación. Seleccionado el material plástico, se iniciará la elaboración de las mezclas de concreto, se utilizará como referencia la norma ASTM C192/C192 “Práctica estándar para la preparación y curado de especímenes de prueba de hormigón en el laboratorio”, para cada mezcla se proponen realizar los ensayos mecánicos y de duración para poder realizar una comparación de resultados y un análisis equivalente al final de la investigación. Para la elección de ensayos a ejecutar, se decidió trabajar con las propiedades más básicas de evaluación del concreto: ensayo de asentamiento, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y módulo de rotura. Además, se seleccionó el ensayo de penetración de cloruros como parámetro para evaluar la durabilidad del concreto y el comportamiento del material ante ambientes agresivos.

La normatividad aplicable a cada ensayo de laboratorio se presenta a continuación:

ESTADO FRESCO		
Toma de muestras	NTC 454	Toma de muestras en el concreto fresco.
asentamiento	NTC 396	Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto.
ESTADO ENDURECIDO		
Resistencia a la compresión	NTC 673	Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto.
Resistencia a la flexión	NTC 2871	Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios).
Resistencia a la tensión indirecta	NTC 722	Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto.
Penetración con cloruros	ASTM C1202-05	Ensayo rápido de permeabilidad del cloruro.

*Tabla 4. Normativas utilizadas como referencia para realizar los ensayos experimentales*

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

### 5.4- GENERALIDADES y moderación DE LOS ENSAYOS

#### 5.4.1- ASENTAMIENTO

Al momento de realizar la mezcla, se espera contar con la ayuda de una mezcladora mecánica de concreto y una amplia área de trabajo, por lo cual pudo realizarse el ensayo de asentamiento a la mezcla en estado fresco. El ensayo consistirá en el llenado del cono de Abraham en 3 capas homogéneas (cada capa compactada con 25 golpes de la varilla compactadora), al aplicar la capa superior y después de enlazarse la superficie, se levanta el molde y se mide el asentamiento como la diferencia vertical entre la altura del cono de Abraham y el centro desplazado de la superficie superior de la mezcla.

#### 5.4.2- RESISTENCIA A COMPRESIÓN $f'_c$

La evaluación de la resistencia a la compresión se realizó para tres edades de curado: 7, 14 y 28 días. Se utilizó la máquina de ensayo del Laboratorio de Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, la cual aplica carga a velocidad constante, fue utilizada con la colaboración y supervisión de los operarios del Laboratorio. El procedimiento realizado durante el ensayo y para calcular la resistencia a compresión de la mezcla se describe a continuación:

- Las probetas de concreto fueron realizadas con la ayuda de formaletas plásticas, al día siguiente de la elaboración de la mezcla se retira la formaleta y se introducen las probetas dentro de la piscina de curado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- El día de ensayo se retiran las probetas de la piscina de curado y se verifica la geometría (diámetro y altura). Cada probeta a ensayar se refrendó con azufre, por lo cual fue necesario tener en cuenta un tiempo de secado para las probetas.
- Preparadas la probeta para el ensayo, se coloca el elemento a ensayar en el centro de la plancha de la máquina de prueba y se aplica carga creciente a velocidad constante hasta llevarla a la falla, se lee la carga máxima resistida por cada muestra.
- Conocida la carga máxima aplicada y las relaciones de geometría solicitadas por la norma, se calcula la resistencia a la compresión con la siguiente ecuación:

$$f'_c = \frac{F}{\pi * \frac{D^2}{4}} * FC$$

#### 5.4.3- RESISTENCIA A FLEXIÓN

La evaluación de la resistencia a la compresión se realizó a los 28 días de curado de cada mezcla. Se utilizó la máquina de ensayo del Laboratorio de Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, la cual aplica carga a velocidad constante, fue utilizada con la colaboración y supervisión de los operarios del Laboratorio.

El procedimiento realizado durante el ensayo y para calcular la resistencia a compresión de la mezcla se describe a continuación:

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

- Una vez retirada la viga de ensayo de la piscina de curado, se procede a medir la sección transversal del elemento y la longitud total, con base en estos datos, se procedió a ubicar los puntos de aplicación de carga, se tomó una luz aproximada a tres veces la altura promedio de cada vigueta y se revisó que la distancia medida entre extremos y apoyo no fuese inferior a 25 mm, como lo recomienda la norma Ntc-2871 y como aparece en el siguiente diagrama:

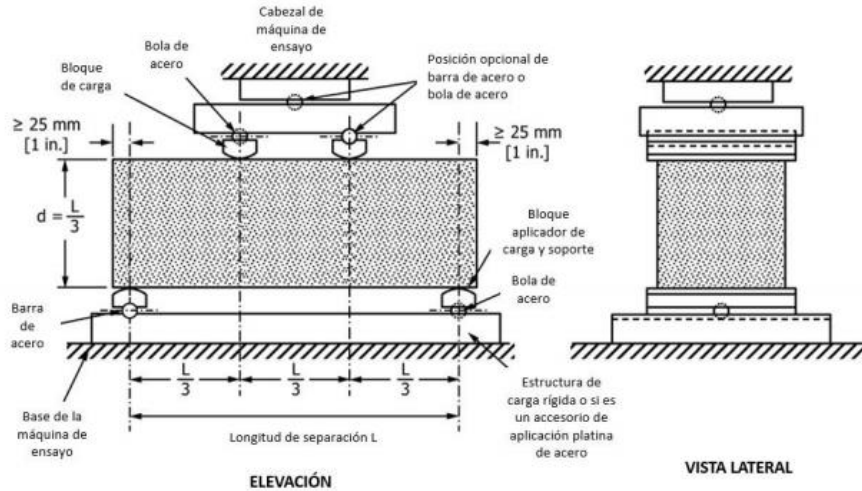


Imagen 4. Diagrama de disposición para el ensayo de resistencia a flexión

- Una vez definidos los puntos de apoyo y aplicación de cargas, se inició la aplicación de carga con una tasa (r) de incremento constante correspondiente a un esfuerzo de la fibra extrema (S) de 1,0 MPa/min. El cálculo de la tasa (r) se hizo de acuerdo a la ecuación del numeral 6.3 de la Ntc-2871:

$$r = \frac{S * b * d^2}{L}$$

En donde:

S = tasa de incremento en el esfuerzo extremo de la fibra, MPa/min

r = tasa de aplicación de carga, MN/min

d = Altura promedio de la viga, mm

b = ancho promedio de la viga, mm

L = Distancia entre apoyos, mm

- Ejecutada la carga de falla, se anotó la carga máxima se localizó el plano de la falla, con base en la ubicación de este plano, se realiza el cálculo de rotura de acuerdo al numeral 8 de la NTC-2871.

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

### 5.4.4- TENSIÓN INDIRECTA

La evaluación de la resistencia indirecta a la tensión se realizó a los 28 días de curado de cada mezcla. Se utilizó la máquina de ensayo del Laboratorio de Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, la cual aplica carga a velocidad constante, fue utilizada con la colaboración y supervisión de los operarios del Laboratorio.

El procedimiento realizado durante el ensayo y para calcular la resistencia a compresión de la mezcla se describe a continuación:

- Las probetas de concreto fueron realizadas con la ayuda de formaletas plásticas, al día siguiente de la elaboración de la mezcla se retira la formaleta y se introducen las probetas dentro de la piscina de curado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- El día de ensayo se retiran las probetas de la piscina de curado y se verifica la geometría (diámetro y altura).
- Preparadas la probeta para el ensayo, se coloca el elemento a ensayar en el centro de la plancha de la máquina de prueba, tal y como se muestra en la imagen a continuación.

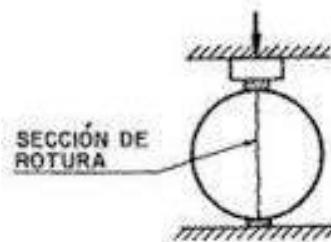


Imagen 5. Diagrama de disposición para el ensayo de resistencia a tensión indirecta

- Se aplica carga creciente a velocidad constante hasta llevarla a la falla, se lee la carga máxima (F) resistida por cada muestra.
- Conocida la carga máxima aplicada y las relaciones de geometría solicitadas por la norma, se calcula la resistencia la compresión con la siguiente ecuación:

$$f'_t = \frac{2 * F}{\pi * D * H}$$

### 5.4.5- PENETRACIÓN DE CLORUROS

El ensayo fue realizado bajo los parámetros de la norma ASTM 1202, el cual consiste en calificar la habilidad del concreto para resistir la penetración de cloruros mediante la aplicación de flujo eléctrico. El ensayo fue realizado luego de 28 días de curado. El procedimiento realizado durante el ensayo y para calcular la resistencia a compresión de la mezcla se describe a continuación:

- La elaboración y curado de las probetas de concreto fueron realizadas con la ayuda de formaletas plásticas, al día siguiente de la elaboración de la mezcla se retira la formaleta y se introducen las probetas dentro de la piscina de curado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. El curado fue de 28.



## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

- Pasados los 28 días, se retiraron las probetas de la piscina de curado y se utilizó la cortadora de concreto de los laboratorios de estructuras y materiales para obtener una rodaja de 5cm de espesor, por cada cilindro, se dejaron pasar 24 horas de para eliminar la humedad superficial de las rodajas, ya que el durante el proceso de corte se utilizó agua.
- Se aplicaron 3 capas de impermeabilizante en las caras de 5,0 cm de espesor, separadas por 5 horas entre una y otra, pasadas las 5 horas de la última capa se sumergieron las rodajas en un recipiente con agua destilada durante un periodo de 24 horas.
- se retiraron las rodajas del contenedor con agua destilada y se utilizó el en el equipo de vacío por 4 horas. Al inicio de la última hora se introdujo agua destilada hasta cubrir las muestras.
- Las rodajas fueron colocadas en las celdas para el ensayo, se dispusieron los cauchos en ambas caras y se aplicaron las soluciones de Hidróxido de sodio y Cloruro de sodio en las caras respectivas de cada celda
- Se realizó la conexión de las sondas de temperatura, los ánodos y los cátodos entre el monitor del programa “PROVEE IT” y cada celda, se garantizando que el flujo eléctrico se realizará correctamente y se inició el ensayo.
- Para cada celda de ensayo se ingresaron los parámetros de: diámetro muestras, voltaje a aplicar (60V), temperatura máxima muestras (90 °C), corriente máxima (500 A) y duración ensayo (6 horas).
- Se inicio el ensayo s, durante el periodo de 6 horas se realizó un control de las muestras por hora. Al finalizar el ensayo el programa de computación genera un reporte con las estadísticas del ensayo.

### 6- RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 6.1- ASENTAMIENTO

En estado fresco se tomó el asentamiento y la masa unitaria de cada mezcla. Los valores obtenidos se presentan a continuación:

mezcla	asentamiento
	cm
1	9
2	11
3	9
4	10

Tabla 5. Resultados del ensayo de asentamiento

#### 6.2- RESISTENCIA A COMPRESIÓN $f'_c$

Los resultados encontrados en laboratorio y cálculos de forma posterior se presentan en la Tabla del presente documento. La evidencia fotográfica se encuentra en el anexo A-1.

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

F'c a los 7 días														
mezcla	probeta	Diámetro (cm)			Altura (cm)				Hprom / Dprom	Factor de corrección	Carga (Kg)	Resistencia (Mpa)	Resistencia adoptada (Mpa)	F'c ensayo / F'c diseño
		D1	D2	DProm	H1	H2	H3	HProm						
1	1	10	10.05	10.03	20.14	20.05	20.12	20.10	2.01	1.00	11000	13.94	11.05	53%
	2	10	10	10.00	20.62	20.63	20.68	20.64	2.06	1.00	8500	10.82		
	3	10.02	10	10.01	20.10	20.11	2.013	14.07	1.41	1.00	6600	8.39		
2	1	10.01	10.01	10.01	20.05	20.12	20.08	20.08	2.01	1.00	1500	1.91	2.37	11%
	2	10.03	10.02	10.03	21.00	20.9	20.9	20.93	2.09	1.00	1800	2.28		
	3	10	10	10.00	20.11	20.08	20.12	20.10	2.01	1.00	2300	2.93		
3	1	10	10.03	10.02	20.11	20.08	20.15	20.11	2.01	1.00	4700	5.97	6.76	32%
	2	10.1	10.2	10.15	19.98	20.03	20.02	20.01	1.97	1.00	5100	6.30		
	3	10	10.01	10.01	19.78	19.87	19.75	19.80	1.98	1.00	6300	8.01		
4	1	10.01	10	10.01	20.98	20.82	20.93	20.91	2.09	1.00	3600	4.58	4.24	20%
	2	10	10	10.00	20.61	20.54	20.64	20.60	2.06	1.00	3300	4.20		
	3	10.02	10	10.01	19.78	19.73	19.94	19.82	1.98	1.00	3100	3.94		

Tabla 6. Resultados del ensayo de resistencia a compresión a los 7 días.

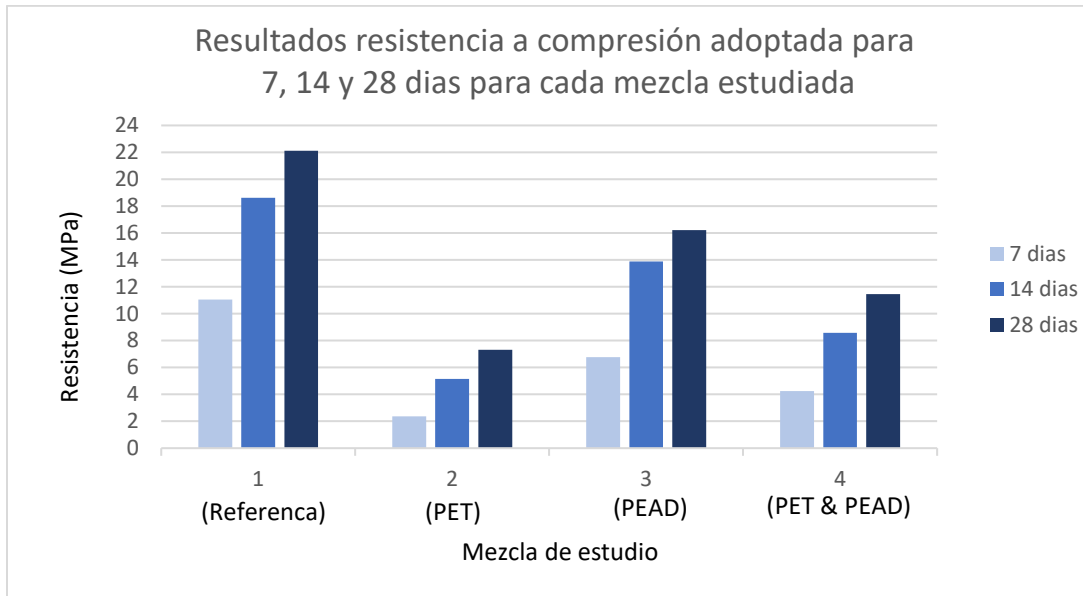
F'c a los 14 días														
mezcla	probeta	Diámetro (cm)			Altura (cm)				Hprom / Dprom	Factor de corrección	Carga (Kg)	Resistencia (Mpa)	Resistencia adoptada (Mpa)	F'c ensayo / F'c diseño
		D1	D2	DProm	H1	H2	H3	HProm						
1	1	10	10.05	10.025	20.14	20.05	20.12	20.10	2.01	1.00	14950	18.94	18.63	89%
	2	10	10	10	20.62	20.63	20.68	20.64	2.06	1.00	15300	19.48		
	3	10.02	10	10.01	20.10	20.11	2.013	14.07	1.41	1.00	13750	17.47		
2	1	10.01	10.01	10.01	20.05	20.12	20.08	20.08	2.01	1.00	4800	6.10	5.16	25%
	2	10.03	10.02	10.025	21.00	20.9	20.9	20.93	2.09	1.00	4200	5.32		
	3	10	10	10	20.11	20.08	20.12	20.10	2.01	1.00	3200	4.07		
3	1	10	10.03	10.015	20.11	20.08	20.15	20.11	2.01	1.00	9600	12.19	13.88	66%
	2	10.1	10.2	10.15	19.98	20.03	20.02	20.01	1.97	1.00	11800	14.58		
	3	10	10.01	10.005	19.78	19.87	19.75	19.80	1.98	1.00	11700	14.88		
4	1	10.01	10	10.005	20.98	20.82	20.93	20.91	2.09	1.00	7200	9.16	8.57	41%
	2	10	10	10	20.61	20.54	20.64	20.60	2.06	1.00	7800	9.93		
	3	10.02	10	10.01	19.78	19.73	19.94	19.82	1.98	1.00	5200	6.61		

Tabla 7. Resultados del ensayo de resistencia a compresión a los 14 días.

F'c a los 28 días														
mezcla	probeta	Diámetro (cm)			Altura (cm)				Hprom / Dprom	Factor de corrección	Carga (Kg)	Resistencia (Mpa)	Resistencia adoptada (Mpa)	F'c ensayo / F'c diseño
		D1	D2	DProm	H1	H2	H3	HProm						
1	1	10	10.05	10.025	20.14	20.05	20.12	20.10	2.01	1.00	17300	21.92	22.12	105%
	2	10	10	10	20.62	20.63	20.68	20.64	2.06	1.00	18200	23.17		
	3	10.02	10	10.01	20.10	20.11	2.013	14.07	1.41	1.00	16750	21.28		
2	1	10.01	10.01	10.01	20.05	20.12	20.08	20.08	2.01	1.00	6000	7.62	7.33	35%
	2	10.03	10.02	10.025	21.00	20.9	20.9	20.93	2.09	1.00	5500	6.97		
	3	10	10	10	20.11	20.08	20.12	20.10	2.01	1.00	5800	7.38		
3	1	10	10.03	10.015	20.11	20.08	20.15	20.11	2.01	1.00	13120	16.65	16.22	77%
	2	10.1	10.2	10.15	19.98	20.03	20.02	20.01	1.97	1.00	11700	14.46		
	3	10	10.01	10.005	19.78	19.87	19.75	19.80	1.98	1.00	13800	17.55		
4	1	10.01	10	10.005	20.98	20.82	20.93	20.91	2.09	1.00	8800	11.19	11.45	55%
	2	10	10	10	20.61	20.54	20.64	20.60	2.06	1.00	8900	11.33		
	3	10.02	10	10.01	19.78	19.73	19.94	19.82	1.98	1.00	9300	11.82		

Tabla 8. Resultados del ensayo de resistencia a compresión a los 28 días.

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**



Gráfica 2. Resumen resultados de los ensayos de resistencia a compresión a los 7, 14 y 28 días valor de resistencia a la compresión adoptado.

**6.3- RESISTENCIA A FLEXIÓN**

Los resultados encontrados en laboratorio para el cálculo de la velocidad de aplicación de carga durante el ensayo (r) y cálculos realizados de forma posterior para el módulo de rotura (R) se encuentran a continuación. La evidencia fotográfica se encuentra en el anexo A-2

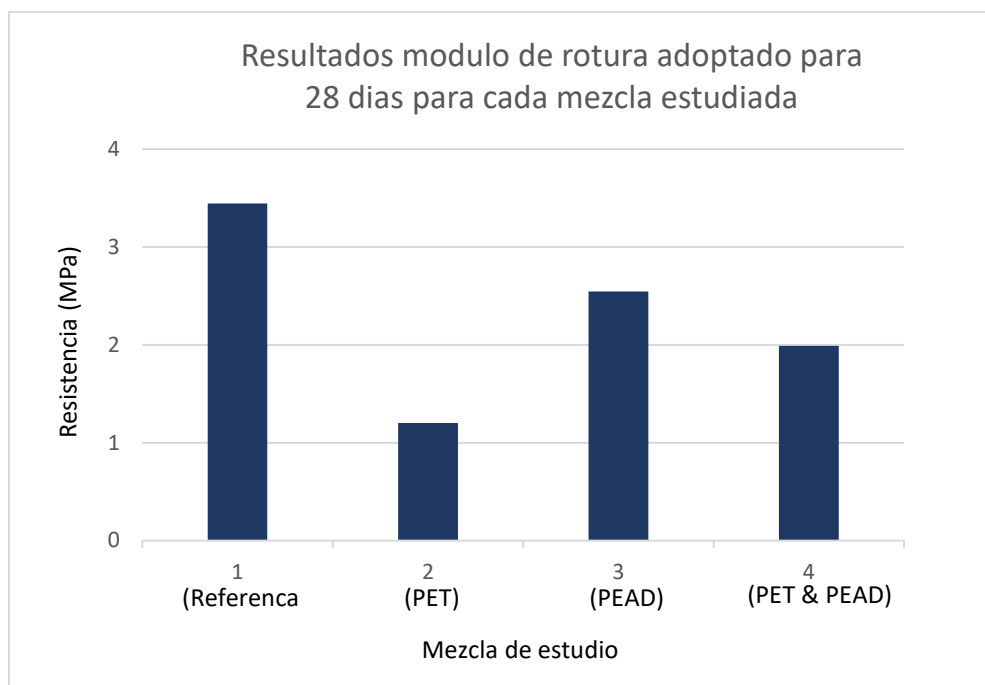
S	b	d	L	r	r
MPa/min	mm	mm	mm	N/min	kg/min
1	150	150	450	7500	750

Tabla 9. Resultados del cálculo de la velocidad de ensayo.

mezcla	probeta	Ubicación plana de falla	Pmax	R	Rprom
			N	MPa	
1	1	1/3 central	29560	3.94	3.44
	2	1/3 central	22100	2.95	
2	1	1/3 central	8466	1.13	1.20
	2	1/3 central	9541	1.27	
3	1	1/3 central	18415	2.46	2.54
	2	1/3 central	19754	2.63	
4	1	1/3 central	14667	1.96	1.99
	2	1/3 central	15175	2.02	

Tabla 10. Resultados del cálculo del Módulo de rotura.

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD



Grafica 3. Resumen resultados de los ensayos de resistencia a flexión a los 28 días, valor de módulo de rotura adoptado.

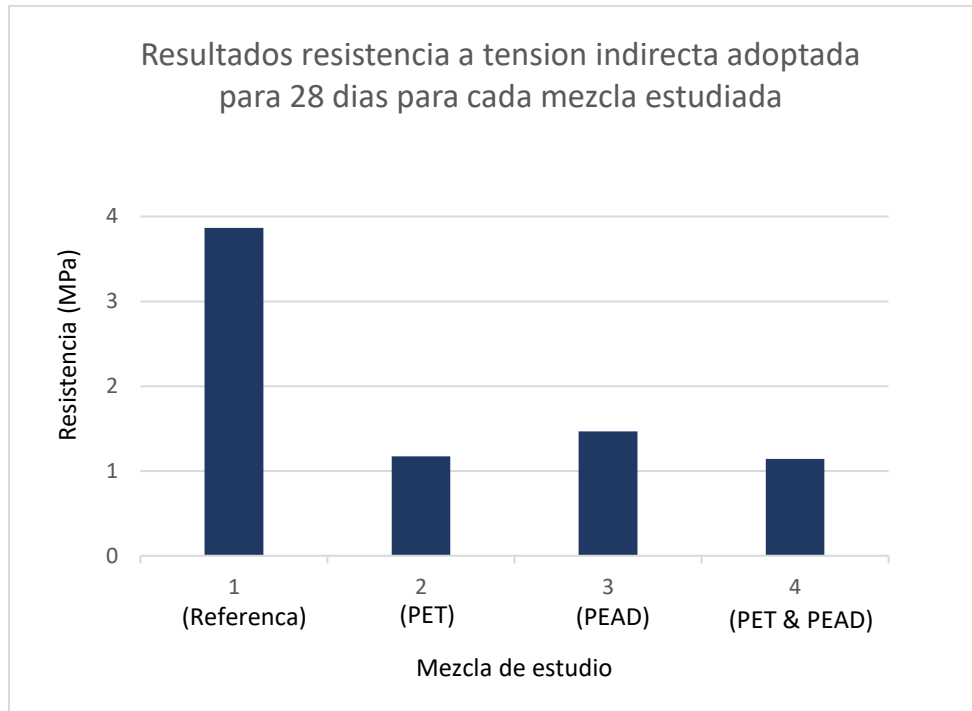
### 6.4- TENSIÓN INDIRECTA

Los resultados encontrados en laboratorio y cálculos realizados de forma posterior para la resistencia se encuentran a continuación. La evidencia fotográfica se encuentra en el anexo A-3

mezcla	probeta	Diámetro (cm)			Altura (cm)				Carga (Kg)	Resistencia $f'_t$ (Mpa)	Resistencia adoptada (Mpa)
		D1	D2	DProm	H1	H2	H3	HProm			
1	1	10.00	10.03	10.02	19.78	19.73	19.94	19.82	9600	3.08	3.87
	2	10.02	10.00	10.01	20.10	20.11	2.01	14.07	10300	4.65	
2	1	10.00	10.01	10.01	19.78	19.87	19.75	19.80	3960	1.27	1.17
	2	10.00	10.00	10.00	20.11	20.08	20.15	20.11	3390	1.07	
3	1	10.10	10.20	10.15	19.98	20.03	20.02	20.01	4340	1.36	1.47
	2	10.01	10.01	10.01	20.05	20.12	20.08	20.08	4960	1.57	
4	1	10.01	10.00	10.01	20.98	20.82	20.93	20.91	3900	1.19	1.14
	2	10.00	10.02	10.00	20.62	20.63	20.68	20.64	3560	1.10	

Tabla 11. Resultados del ensayo de resistencia a la tensión indirecta a los 28 días.

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**



Grafica 4. Resumen resultados de los ensayos de resistencia a tensión indirecta a los 28 días, valor resistencia adoptada.

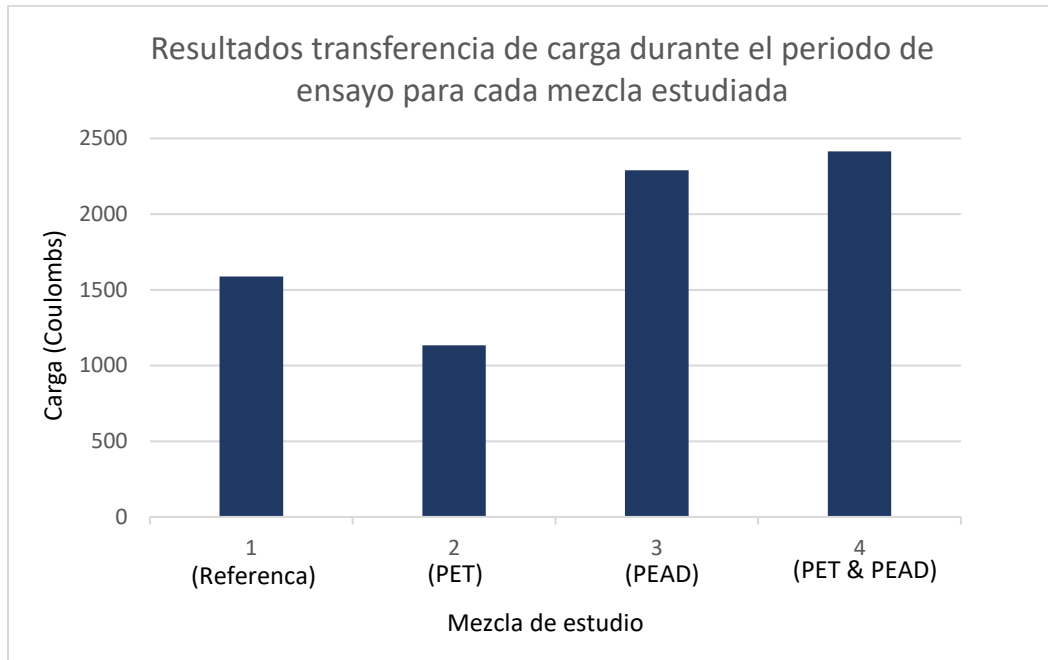
**6.5- PENETRACIÓN DE CLORUROS**

A continuación, se presentan los reportes obtenidos por el programa de computador luego del ensayo realizado. La evidencia fotográfica se encuentra en el anexo A-4.

Mezcla	Diámetro [mm]	Voltaje [V±0.1V]	Corriente [mA]	Temperatura [°C]	Tiempo total [hh:mm]	Carga estimada [C]	Carga real [C]	Clase de permeabilidad
1	102	60	77.5	37.5	6:00	1591	1589	Baja
2	101	60	73.2	28.6	6:00	1134	1133	Baja
3	101	60	183.7	36.2	6:00	2291	2290	Moderada
4	100	60	174.1	35.5	6:00	2414	2415	Moderada

Tabla 12. Resultados del ensayo de penetración ion cloruros a los 28 días.

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD



*Grafica 5. Resumen resultados de los ensayos penetración de cloruros a los 28 días, valor carga transferida durante el ensayo.*

### 6.6- COMPARACION Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

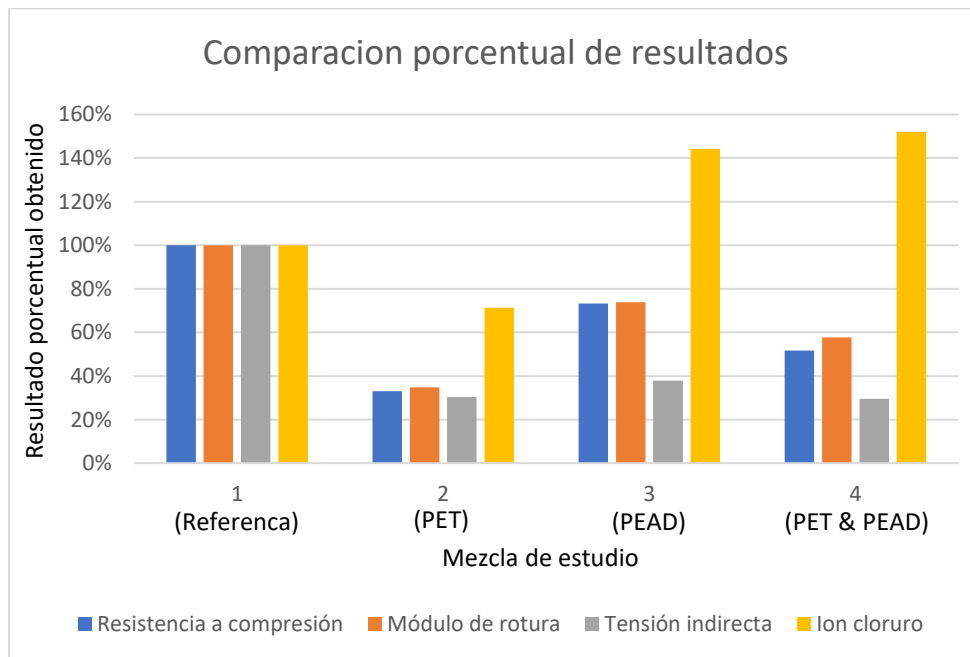
Para los ensayos de asentamiento, a excepción de la mezcla 2, los valores de obtenidos se encuentran dentro del rango de diseño de mezcla de 3" - 4" y por lo tanto son valores aceptables. Aunque la mezcla 2 presento un mayor asentamiento al esperado, dado que en asentamiento obtenido presenta una desviación menor al 10%, con respecto al mayor valor esperado, se acepte el valor de asentamiento y los resultados de los demás ensayos. La manejabilidad general de cada mezcla era buena y no evidenciaba segregación de materiales. Al momento de la mezcla, los concretos elaborados con material termoplástico no presentaron dificultades, a diferencia de mezclas realizadas en otras investigaciones con poliestireno expandió en las cuales el material podía flotar en el aire y no generaban una buena adherencia.

Como se pudo observar en los resultados de los ensayos de resistencia a compresión, flexión y tensión. La mezcla 1 presento un comportamiento dentro de los parámetros esperados, por lo cual los resultados son aceptados y sirven como parámetro de comparación para las demás mezclas, las mezclas realizadas con material plástico presentaron una resistencia inferior a la resistencia de diseño, por lo cual se puede decir que el remplazo de un 25% del agregado fino por el material seleccionado representa una afectación significativa en el comportamiento del concreto. Aunque las mezclas 2, 3 y 4 no presentan resultados aceptables de resistencia, se logra identificar un patrón de comportamiento entre los resultados de los ensayos de compresión y flexión: La mezcla 3, concreto con 25% de agregado fino remplazado por PEAD, presento el mejor comportamiento estructural de las probetas con material plástico (llegando a obtener un 75% de las resistencias esperadas), por el contrario, la mezcla 2, concreto con 25% de agregado fino remplazado por PET)

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

presento el peor comportamiento plástico (llegando a obtener un 35% de las resistencias esperadas). La mezcla 4 presento un comportamiento intermedio, dado que contenía cantidades similares de los 2 materiales estudiados, como era de esperarse, presentó comportamientos estructurales que se encuentran cerca de un punto medio entre los resultados obtenidos para las mezclas 2 y 3. Respecto a los resultados del ensayo de resistencia a tensión indirecta se observa que ninguna de las mezclas de concreto con agregado plástico logro alcanzar una tercera parte de la resistencia esperada, con respecto al resultado obtenido en la mezcla 1.

Como se pudo observar en los resultados del ensayo de penetración de ion cloruro, las 4 mezclas presentaron un buen comportamiento respecto a la penetración del ion, cada muestra terminar los periodos de ensayo sin superar los valores límite de amperaje y temperatura, en este caso se observa que la mezcla 4 presento la mayor carga, la carga para la muestra 3 es cercana a la de la muestra 4 pero con un valor menor, la carga para la mezcla 2 es mayor a la de la mezcla 1, pero menor al de las mezclas 4 y 3. Estos resultados apoyan la hipótesis en la que se suponía al plástico como material que impediría que la presencia de, sin embargo los resultados presentan al material de la mezcla 2 como el que presenta mejor resistencia a la penetración del ion, sin embargo la diferencia no está muy por debajo de lo que de obtuvo con la mezcla 1.



*Grafica 6. Resumen de resultados para ensayos de mezcla pasados los 28 días resultados porcentuales comparativos*

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

### 7-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La reutilización de materiales plásticos disminuye el impacto ambiental que generan diferentes industrias, reduce los volúmenes de material no degradable que ingresa a vertederos o rellenos sanitarios, reduce los costos de explotación de materias primas, implica un menor consumo de energías no renovables, crea una nueva industria de económica que incentiva la creación de nuevos productos y ayuda a las economías emergentes.
- La idea de introducir materiales considerados como “desechos” en las mezclas de concreto permite encapsular elementos de difícil degradación y en disminuir los costos y los volúmenes de producción de concretos elaborados con materias primas como cemento agua y agregados pétreos. La encapsulación de materiales desechables podría presentar un provecho adicional, alterando favorablemente las propiedades estructurales de una mezcla de concreto, efecto que no es conseguido con todos los materiales (como ocurre esta investigación), podría disminuirse de manera considerable el uso de materias primas sin afectar el comportamiento estructural o incluso mejorarlo.
- Los materiales termoplásticos son de los materiales más difíciles de degradarse en la naturaleza, tardan más de 100 años, además de ser una fuente importante de gases de efecto invernadero, afecta los ecosistemas, el hábitat y la cadena alimenticia los seres vivos (incluyendo al ser humano). El empleo de estos materiales en la elaboración de elementos con un espesor relativamente pequeño (como el caso de la industria del almacenamiento o de la elaboración de carcasas de protección, en el cual los productos no presentan espesores mayores a los 2 cm), por lo cual estos materiales pueden utilizarse con facilidad en la elaboración de concretos.
- En algunos elementos elaborados con termoplásticos la relación entre el espesor y la longitud del elemento puede ser muy pequeña, por lo que se requiere un proceso de trituración para aprovechar el material termoplástico en la elaboración de concretos, si se desea utilizar este material con el fin de generar un aporte estructural en el concreto, dado que se requiere un proceso de trituración, los termoplásticos podrían utilizarse en la elaboración del concreto, reemplazando parte de los agregados pétreos con tamaño de partícula medio o pequeño.
- Para los materiales termoplásticos utilizados en esta investigación (Polietileno de Alta Densidad PEAD y Tereftalato de polietileno PET), se concluyó que su uso en la elaboración de concretos estructurales, usándolos como remplazo del 25% del volumen del agregado fino, implicó una disminución en las propiedades estructurales de las probetas ensaladas y por ende el uso del diseño de mezcla de concreto, para elaboración de cualquier elemento estructural, no es recomendado ya que los elementos presentarían propiedades estructurales por debajo de los rangos de aprobación.
- Se realizaron 4 mezclas de concreto, todas con un mismo diseño de mezcla, cada una con diferentes porcentajes de agregado pétreo fino (arena) reemplazados por desecho de Tereftalato de polietileno (PET) y Polietileno de Alta Densidad (PEAD): la mezcla 1 presentaba un 100% de agregados pétreos, la mezcla 2 presentaba un 75% de agregados pétreos y un 25% de desecho de PET, la mezcla 3 presentaba un 75% de agregados pétreos y un 25% de desecho de PEAD y la mezcla 4 presentaba un 75% de agregados pétreos y un 12.5% de desecho de PET y 12.5% de desecho de PEAD.



## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

- El tamaño de partículas de agrado PET y PEAD se obtuvo de un proceso de trituración utilizado para procesos de peletización y reutilización de material termoplástico a nivel industrial, obteniendo diámetros aproximados de icopor entre 1 mm y 10 mm (siendo las partículas de PEAD las de mayor tamaño, en comparación a las partículas de PET).
- Mientras que el comportamiento del concreto en estado fresco se mantuvo constante en las mezclas de concreto con o sin agregado plástico, conclusión realizada desde con los resultados de asentamiento; la resistencia mecánica a compresión, tensión indirecta y flexión se vio afectada de manera significativa.
- Los resultados evidencian que el uso de PEAD en la elaboración de mezclas de concreto presenta mejores comportamientos mecánicos, con respecto al PET. Los ensayos mecánicos presentan resultados que comprueban como la mezcla3 presenta un mejor comportamiento que mezcla2. Con respecto a los resultados obtenidos por la mezcla1 (mezcla de prueba): la mezcla3 alcanzo un 75% de las resistencias esperadas, mientras que la mezcla2 solo alcanzo un 35% y la mezcla4 alcanzo un 55%, se presume que este último valor se debe a que para la mezcla4 el volumen de remplazo se conformó, por partes iguales, de los dos materiales estudiados. Aunque que ambos materiales (PET y PEAD) presentaron comportamientos diferentes en las mezclas 2 y 3 (presentándose en similares volúmenes), la mezcla 4 presento resultados linealmente proporcionales en función de los volúmenes de material PET y PEAD.
- El uso de materiales termoplásticos, sin importar el tipo de material o la proporción de uso afecto drásticamente los resultados de resistencia a tensión indirecta para las mezclas 2, 3 y 4. Con respecto a los resultados obtenidos por la mezcla 1 (mezcla de prueba): la mezcla 3 alcanzo un 38% de las resistencias esperadas, mientras que la mezcla 2 y 4 solo alcanzaron un 30%.
- Del ensayo de penetración del ion cloruro se puede observar cómo en comparación al resultado obtenido por la mezcla1: la mezcla2 presento una disminución del 29% en la carga de coulomb percibida, las mezclas 3 y 4 presentaron un aumento del 44% y del 55% en la carga de percibida, respectivamente. Se puede afirmar que el material PET presento características que permitieron disminuir la penetración de los cloruros en el concreto, aunque los resultados con este agregado no están muy por debajo de los que se pueden obtener con un concreto normal. Por el contrario, el material PEAD presento una mayor permeabilidad ante los iones cloruro. De los ensayos realizados se puede concluir que la mezcla con PET presento una permeabilidad a cloruros menor con respecto a las mezclas con PET y con ambos materiales, por lo que la presencia del PET podría significar una disminución en la corrosión.
- Aunque las propiedades mecánicas de los elementos ensayados no presentaron resultados estructurales aceptables, el comportamiento, la manejabilidad y los acabados del concreto no se vieron afectados por la presencia de los agregados plásticos. Por lo cual esta mezcla de concreto podría utilizarse ara concretos con acabados arquitectónicos y pisos con bajas prestaciones de carga.

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

- El precio de los materiales termoplásticos tiene un precio muy superior al de la arena natural el kilo material termoplásticos triturado, al detal, tiene precios 5 o 6 veces mayores que la arena de peña, factor que incide drásticamente en la elaboración de las mezclas de concreto. El aumento del valor económico se debe a la inversión requerida para triturar el material plástico hasta las dimensiones deseadas.
- El autor recomienda complementar este estudio con una investigación más profunda, aumentando el tipo de materiales termoplásticos y estudiando la combinación de diferentes materiales (teniendo en cuenta que en el contexto colombiano los materiales plásticos no se encuentran clasificados o separados en su mayoría), especificando los orígenes del material utilizado, aumentando el número de muestras a probar y ensayos de laboratorio a desarrollar, dado que los resultados encontrados en este trabajo evidencian que el concreto elaborado con desechos de material termoplástico (especialmente el PEAD) tiene potencial para ser usado como material de construcción.
- El autor recomienda complementar este estudio realizando ensayo de absorción, contracción y módulo de elasticidad y durabilidad, igualmente, se recomienda hacer un estudio morfológico y mecánico de los agregados sueltos, tanto materiales pétreos como termoplásticos.
- El proceso de mezclado normal del concreto permitió una distribución homogénea del material, por lo cual no se tiene ninguna recomendación especial para el proceso de mezclado con la inclusión de los materiales termoplásticos.

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

### 8- BIBLIOGRAFÍA

Mobasher, B. (2008), USA-concrete construction industry-cement based materials and civil infrastructure. CBM-CI International Workshop, Karachi, Pakistan, 73-90. [https://www.academia.edu/download/30694963/mobasher\\_Karachi\\_CBM-CI.pdf](https://www.academia.edu/download/30694963/mobasher_Karachi_CBM-CI.pdf)

BBC News Mundo, Rodgers, L. (2018, 17 diciembre). La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías. BBC News Mundo. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783#:~:text=El%20concreto%20es%20el%20material,una%20enorme%20huella%20de%20carbono.>

Á. (2020, septiembre 16). Ensayos a tracción del hormigón: Ensayos Indirectos. MÁS QUE INGENIERÍA. <https://masqueingenieria.com/blog/ensayos-a-traccion-indirecta-del-hormigon/>

A.C.O.P.L.Á.S.T.I.C.O.S. (2020, enero 1). ¿Qué son los plásticos? ACOPLÁSTICOS. <https://www.acoplasticos.org/index.php/mnu-pre/opm-bus-pref/33-opc-fag-pre1>

AGREDA SOTELO, G. A., & MONCADA MORENO, G. L. (2015, diciembre). VIABILIDAD EN LA ELABORACIÓN DE PREFABRICADOS EN CONCRETO USANDO AGREGADOS GRUESOS RECICLADOS. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/4550/4/Viabilidad-elaboraci%C3%B3n-prefabricados-concreto-con-agregados-gruesos-recicladados.pdf>

Alvarán, V. E. (2018, julio 18). Concretos resistentes a sulfatos. Comunidad 360. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/concretos-resistentes-a-sulfatos>

Alvarán, V. E. (2018, agosto 1). Módulo elástico: Factores que influyen en el resultado, evaluación, materias primas (importancia del agregado grueso). Comunidad 360. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/modulo-elastico>

Alvarán, V. E. (2018, agosto 1). Concreto traslúcido: Viendo a través de las estructuras. Comunidad 360. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/concreto-traslucido>

Alvarán, V. E. (2018d, septiembre 18). Agregados reciclados: ¿Qué y para qué? Comunidad 360. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/agregados-recicladados-que-y-para-que>

Alvarán, V. E. (2018, julio 17). Cinco cosas que debes saber del Concreto de Ultra Alto Desempeño. Comunidad 360. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/cinco-cosas-que-debes-saber-del-concreto-de-ultra-alto-desempeno>

Álvarez, C. (2010, 30 octubre). ¿Cuántas veces se puede reciclar? EL PAÍS-Blogs. <https://blogs.elpais.com/eco-lab/2010/10/cuantas-veces-se-puede-reciclar.html>

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

Asocreto, A. (2020, 23 abril). Lo que debes saber sobre los CONCRETOS ESPECIALES: PESO PESADO Y LIGERO. Comunidad 360. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/lo-que-debes-saber-sobre-los-concretos-especiales-peso-pesado-y-ligero-1>

Bosch, C. (2020, 4 marzo). Cinco soluciones de reciclaje químico de envases plásticos. Residuos Profesional. <https://www.residuosprofesional.com/soluciones-reciclaje-quimico-plasticos/>

Causas químicas del deterioro del hormigón. (2019, 17 marzo). ANFAPA - ASOCIACIÓN FABRICANTES MORTEROS Y SATE. <https://anfapa.com/articulos-tecnicos-morteros-de-reparacion-de-hormigon/1164/causas-quimicas-del-deterioro-del-hormigon>

Chan Yam, J. L., Solís Carcaño, R., & Moreno, E. I. (2003, 1 agosto). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. Universidad Autónoma de Yucatán Mérida. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46770203.pdf>

Instituto Mexicano del Plástico Industrial & Centro Empresarial del Plástico. (18997). Enciclopedia del plástico 2000 (2.a ed., Vol. 1). IMPI.

Clasificación de los plásticos. (2012, 4 junio). Macromoléculas de los Plásticos. <http://trabajoquimica204.blogspot.com/2012/06/clasificacion-de-los-plasticos-de.html>

Girón Vargas, H. A. (1998, 1 octubre). Ataque por cloruros en el concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. <http://www.imcyc.com/revista/1998/oct/ataque.htm>

<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/14537/u441265.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, C. A. (2005, diciembre). file:///D:/Archivos/PROYECTO-SEMILLERO/PROYECTO%20DIRIJIDO/BIBLIOGRAFIA/u441265.pdf. UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/14537/u441265.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Lic. Eduarda Bordón. (2019, 31 mayo). Propiedades del plástico. ABC Color. <https://www.abc.com.py/edicion-impres/suplementos/escolar/propiedades-del-plastico-407352.html>

Londoño, E. (2018, 30 julio). Lo que debes saber sobre el ataque de sulfato en el concreto. Comunidad 360. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/ataque-de-sulfato-en-el-concreto>

López, G. L. (2019, 24 junio). El concreto y otros materiales para la construcción. repositorio universidad nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9302>

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

Majana Acosta, E., & Echeverry Campos, D. (2018, 27 septiembre). Aplicaciones de materiales potencialmente reciclables en la construcción de VIS. Repositorio universidad de los andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/9415>

Mariano, V. (2011a, marzo 5). CODIGOS DE LOS PLASTICOS. Tecnología de los Plásticos. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/codigos-de-los-plasticos.html>

Mariano, V. (2011b, junio 1). Polietileno de alta densidad. Tecnología de los Plásticos. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/polietileno-de-alta-densidad.html>

Mariano, V. (2011c, junio 27). PROPIEDADES MECANICAS. Tecnología de los Plásticos. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/propiedades-mecanicas.html>

Martínez, R. (201-01-21). ¿Por qué se deteriora una estructura de hormigón? Interempresas. <https://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/37070-Estructuras-de-hormigon.html>

Osorio, J. D. (2018, 26 diciembre). CARBONATACIÓN DEL CONCRETO: ¿CÓMO DETECTARLA? Comunidad 360. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/carbonatacion-del-concreto-como-detectarla#:~:text=La%20carbonataci%C3%B3n%20en%20el%20concreto,tiene%20un%20pH%20m%C3%A1s%20neutral.>

Osorio, J. D. (2020a, enero 9). Diseño de mezclas de concreto: Conceptos básicos. Comunidad 360. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/calidad-y-aspectos-tecnicos/disenio-de-mezclas-de-concreto>

Osorio, J. D. (2020b, enero 9). TENDENCIAS DE LA TECNOLOGÍA DEL CONCRETO: TIPOS DE CONCRETOS. Comunidad 360. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/tendencias-tecnologia-del-concreto-tipos-de-concretos>

Posada Bustamante, B. (2012, 15 agosto). La degradación de los plásticos | Revista Universidad EAFIT. Revista Universidad EAFIT. <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1408>

Propiedades de las Rocas. (2007, 16 septiembre). UNIVERSIDAD DE GRANADA. <https://www.ugr.es/%7Eagcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm>

Raffino, M. E. (2020, 4 julio). Plástico. Concepto. <https://concepto.de/plastico/>  
Redacción. (2020, 23 enero). National Geographic. [www.nationalgeographic.com.es](http://www.nationalgeographic.com.es). [https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/actualidad/tipos-plastico-segun-su-facilidad-reciclaje\\_12714/7](https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/actualidad/tipos-plastico-segun-su-facilidad-reciclaje_12714/7)

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

Silva, O. J. S. (2018, 31 julio). Tipos de agregados y su influencia en el diseño de mezcla del concreto. Comunidad 360. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/tipos-de-agregados-y-su-influencia-en-mezcla-de-concreto>

Tipos de poliestireno: características y usos. (2019, 24 diciembre). Mwmaterialsworld - blog. <https://www.mwmaterialsworld.com/blog/tipos-de-poliestireno/>

Torres Ospina, H. A. (2015, diciembre). VALORACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE CONCRETO ADICIONADO CON RESIDUOS DE LLANTAS DE CAUCHO. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/169>

V, R. (2000, 1 diciembre). la carbonatación, enemigo olvidado del concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto-Revista Construcción y Tecnología. <http://www.imcyc.com/revista/2000/dic2000/carbonatacion.htm>

Zuluaga Molina, F. J. (2013, diciembre). Evaluación del comportamiento del concreto elaborado con desechos de icopor. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/56>

# EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

## ANEXOS

### ANEXO A-1



Imagen 6. Probetas para ensayo a compresión a los 7 días.



Imagen 10. Cara superior típica de un cilindro.



Imagen 7. Probetas para ensayo a compresión a los 14 días.



Imagen 11. Instalación de probetas en máquina de ensayo



Imagen 8. Probetas para ensayo a compresión a los 28 días.



Imagen 9. Cara inferior típica de un cilindro.

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**



*Imagen 12. Probeta fallada a compresión axial a los 7 días*



*Imagen 13. Probeta fallada a compresión axial a los 7 días*



*Imagen 14. Probeta fallada a compresión axial a los 7 días*



*Imagen 15. Probeta fallada a compresión axial a los 7 días*



**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**



*Imagen 16. Probeta fallada a compresión axial a los 14 días.*



*Imagen 17. Probeta fallada a compresión axial a los 14 días.*



*Imagen 18. Probeta fallada a compresión axial a los 14 días.*



*Imagen 19. Probeta fallada a compresión axial a los 14 días.*

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**



*Imagen 20. Probeta fallada a compresión axial a los 28 días.*



*Imagen 21. Probeta fallada a compresión axial a los 28 días.*



*Imagen 22. Probeta fallada a compresión axial a los 28 días.*



*Imagen 23. Probeta fallada a compresión axial a los 28 días.*

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

**ANEXO A-2**



*Imagen 24. Probetas para ensayo a flexión a los 28 días.*



*Imagen 25. Instalación de probetas en máquina de ensayo.*



*Imagen 26. Probeta fallada a flexión a los 28 días.*

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**



*Imagen 27. Sección de falla mezcla 1*



*Imagen 28. Sección de falla mezcla 2*



*Imagen 29. Sección de falla mezcla 3*



*Imagen 30. Sección de falla mezcla 4*

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

**ANEXO A-3**



*Imagen 31. Instalación de probetas en máquina de ensayo.*



*Imagen 33. Mezcla 2, probeta fallada a tensión indirecta a los 28 días.*



*Imagen 32. Mezcla 1, probeta fallada a tensión indirecta a los 28 días.*



*Imagen 34. Mezcla 3, probeta fallada a tensión indirecta a los 28 días.*

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**



*Imagen 35. Mezcla 4, plano de falla a tensión indirecta a los 28 días.*

# EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

## ANEXO A-4



Imagen 36. Equipo para cortar las probetas en muestras de 5cm de espesor

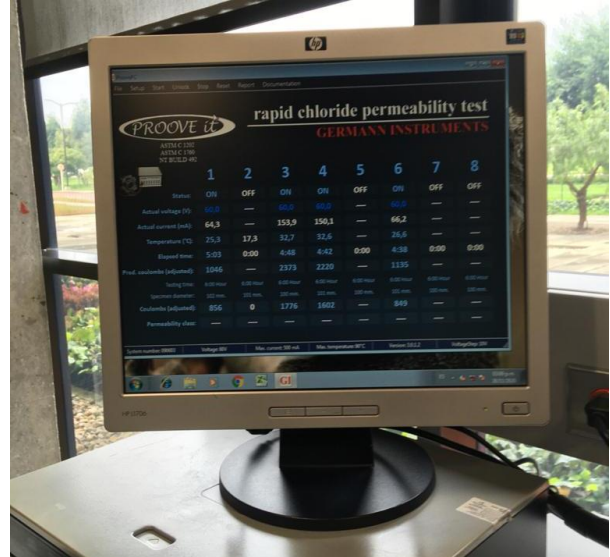
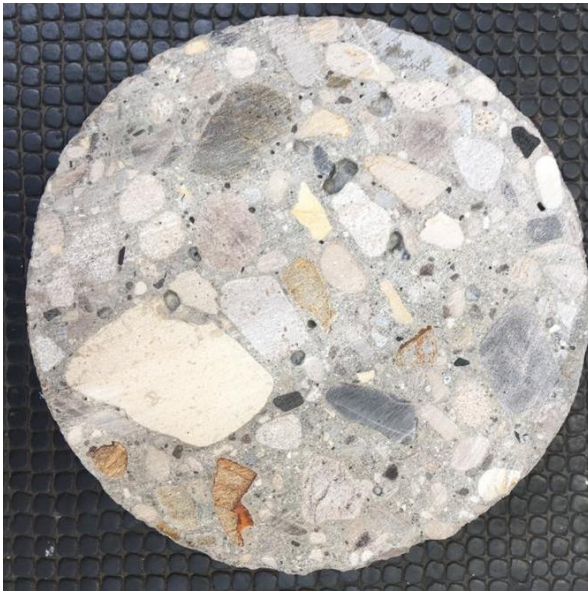


Imagen 37. Pantalla que muestra avance del ensayo de permeabilidad al ion cloruro. Programa "PROVE IT".



Imagen 38. Muestras durante ensayo de permeabilidad al ion cloruro

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**



*Imagen 38. Muestra matriz de concreto en cilindro de mezcla 1.*



*Imagen 39. Muestra matriz de concreto en cilindro de mezcla 3.*



*Imagen 40. Muestra matriz de concreto en cilindro de mezcla 2.*



*Imagen 41. Muestra matriz de concreto en cilindro de mezcla 4.*



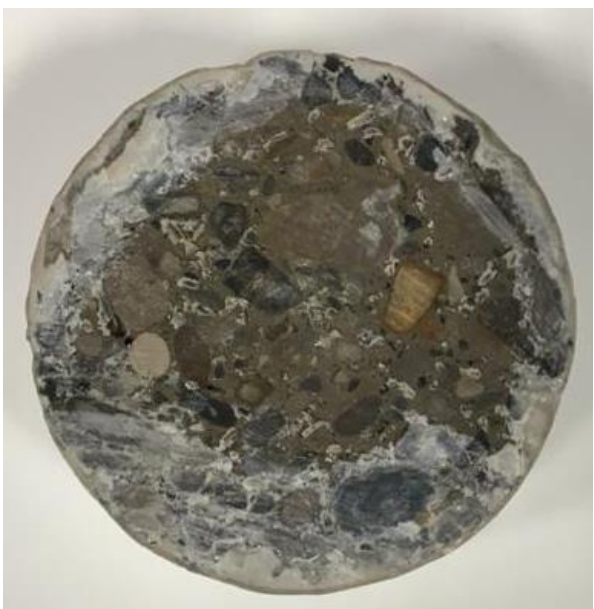
**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**



*Imagen 42. Probeta de mezcla 1 después del ensayo.*



*Imagen 43. Probeta de mezcla 3 después del ensayo.*



*Imagen 45. Probeta de mezcla 2 después del ensayo.*



*Imagen 46. Probeta de mezcla 4 después del ensayo.*