



Universidad **Mariana**

Mejoramiento del Concreto con PET para la Manufactura de Elementos Prefabricados

Andrés Felipe Pantoja Ortega

Luis Ángel Oliva Patiño

Oscar Iván Montaña Quintero

Universidad Mariana

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

San Juan de Pasto

2023

Mejoramiento del Concreto con PET para la Manufactura de Elementos Prefabricados

Andrés Felipe Pantoja Ortega

Luis Ángel Oliva Patiño

Oscar Iván Montaña Quintero

Informe de investigación para optar al título de: Ingeniero Civil

Mg. Mauricio David Pabón Miño

Asesor

Universidad Mariana

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

San Juan de Pasto

2023

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007

Universidad Mariana

Agradecimientos

Primero, agradezco a mi mamá, ya que siempre ha sido el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, ha estado siempre a mi lado en los días y noches más difíciles durante mis horas de estudio. Siempre ha sido mi mejor guía de vida. Hoy cuando concluyo mis estudios, le dedico este logro.

A nuestro asesor, Mauricio David Pabón Miño, Ingeniero Civil y Magister en Geotecnia. Sus consejos fueron siempre útiles para cumplir con el objetivo de esta investigación; él ha formado parte de un equipo de trabajo y con sus aportes logramos alcanzar esta meta. Muchas gracias por sus múltiples orientaciones.

Andrés Felipe Pantoja Ortega

Gracias a Dios y mi madre que han sido fuente de energía para culminar este proceso tan importante ya que fueron la base y la ayuda de todo mi trayecto de estudio, tus consejos de ánimo madre, fueron el camino de la fe y la esperanza a seguir por que lo único que me mantenía en pie era la forma tan ciega de confiar y creer en mí, en que si lo puedo lograr.

A mi compañero de trabajo, a pesar de las dificultades siempre estuvo atento de todo obstáculo, nunca se dio por vencido siempre buscaba una alternativa para culminar de la mejor manera con los objetivos.

Oscar Iván Montaña Quintero

Gracias a mi familia, por ser un gran apoyo durante mi vida y especialmente, por haberme permitido culminar este proceso a partir de sus consejos y quienes de manera valiosa se han manifestado con todo su respaldo y aliento durante el desarrollo de esta investigación.

Gracias a Dios por permitirnos avanzar en este trabajo y por haber contribuido a forjar la persona que soy hoy en día.

A nuestro asesor de esta investigación, Mauricio David Pabón Miño, Ingeniero Civil y Magister en Geotecnia, por su disponibilidad de tiempo y por sus aportes en el desarrollo de esta investigación.

Luis Ángel Oliva Patiño

Contenido

Introducción	14
1. Resumen del proyecto	16
1.1. Descripción del problema	16
1.1.1. Formulación del problema.....	17
1.2. Justificación	17
1.3. Objetivos.....	18
1.3.1. Objetivo general	18
1.3.2. Objetivos específicos.....	18
1.4. Marco referencial.....	19
1.4.1. Marco contextual.....	19
1.4.2. Marco teórico.....	20
1.4.2.1. Material PET.	20
1.4.2.2. Concreto.	21
1.4.2.2.1. Propiedades del concreto.....	22
1.4.2.2.2. Trabajabilidad.....	22
1.4.2.2.3. Cohesividad.....	22
1.4.2.2.4. Resistencia.....	22
1.4.2.2.5. Durabilidad.....	23
1.4.2.3. Agregados.....	23
1.4.2.4. Cemento.	24
1.4.2.4.1. Tipos de cemento.	24
1.4.2.5. Máquina universal.....	28
1.4.3. Marco legal.....	28
1.5. Estado de arte.....	29
1.6. Metodología.....	31

1.6.1. Diseñar una mezcla de concreto de 12 MPa.....	31
1.6.1.1. Caracterización de agregados.....	31
1.6.1.1.1. Agregados finos.....	32
1.6.1.1.2. Agregados gruesos	35
1.6.1.2. Definición del asentamiento.....	37
1.6.1.3. Tamaño del agregado.....	38
1.6.1.4. Contenido de agua.....	39
1.6.1.5. Resistencia a la compresión.....	41
1.6.1.6. Relación agua-cemento.....	42
1.6.1.7. Cantidad de cemento.....	42
1.6.1.8. Cantidad de los agregados.....	43
1.6.1.9. Cantidad de agregado grueso.....	43
1.6.1.10. Cantidad de agregado fino.....	44
1.6.1.11. Ajustes de agua.....	44
1.6.2. Incorporación de PET en la mezcla de concreto	44
1.6.3. Pruebas de resistencia del concreto	45
1.6.3.1. Ensayo de resistencia a la compresión.....	45
1.6.3.1.1. Caracterización del espécimen.....	46
1.6.3.1.2. Loción de espécimen.....	46
1.6.3.1.3. Verificación de cero y asentamiento del bloque.....	46
1.6.3.1.4. Velocidad de carga.....	46
1.6.3.1.5. Falla.....	46
1.6.3.2. Ensayo de resistencia a la flexión.....	47
1.6.3.3. Cronograma y cantidad de probetas para los ensayos.....	48
1.6.4. Campo de investigación	49
1.6.5. Tipo de investigación	49
1.6.6. Enfoque de investigación	49
1.6.7. Hipótesis.....	49

2.	Presentación de resultados	51
2.1.	Diseño de la mezcla de concreto.....	51
2.1.1.	Caracterización de los agregados	51
2.1.1.1.	Masa unitaria.....	51
2.1.1.3.	Densidad y absorción agregado fino.....	53
2.1.1.4.	Densidad y absorción del agregado grueso.....	53
2.1.1.5.	Porcentajes de humedad.....	53
2.1.2.	Caracterización del cemento.....	55
2.1.3.	Caracterización de las fibras PET.....	55
2.1.4.	Diseño de la mezcla de concreto basado en la A.C.I.....	56
2.1.4.1.	Cantidades de diseño para 1m ³ de concreto.....	59
2.1.4.2.	Cantidad de concreto para la investigación.....	60
2.1.4.3.	Cantidad de PET.....	61
2.2.	Incorporación de la fibra de PET en la mezcla de concreto	61
2.3.	Elaboración de probetas.....	63
2.4.	Ensayos de resistencia	66
2.4.1.	Resultados obtenidos de resistencia	66
2.4.1.1.	Concreto con edad de 7 días.....	67
2.4.1.2.	Concreto con edad de 14 días.....	68
2.4.1.3.	Concreto con edad de 21 días.....	69
2.4.1.4.	Concreto con edad de 28 días.....	70
2.5.	Resultados y análisis.....	72
3.	Conclusiones	78
4.	Recomendaciones.....	80
	Bibliografía.....	81
	Anexos.....	86

Índice de Tablas

Tabla 1. Requisito de resistencia a la compresión para mampostería no estructural.	28
Tabla 2. Requisitos de resistencia a la compresión para mampostería estructural.	29
Tabla 3. Asentamiento del concreto.	38
Tabla 4. Tamaños máximos de los agregados según el tipo de construcción.	39
Tabla 5. Cantidad de agua con partículas de forma redondeada y textura liza, en concreto sin aire incluido.	39
Tabla 6. Cantidad de agua con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto sin aire incluido.	40
Tabla 7. Cantidad de agua con partículas de forma redondeada y textura liza, en concreto con aire incluido.	40
Tabla 8. Cantidad de agua con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto con aire incluido.	41
Tabla 9. Resistencia a la compresión de diseño.	42
Tabla 10. Relación agua-cemento.	42
Tabla 11. Relación b.	43
Tabla 12. Cronograma de ensayos.	48
Tabla 13. Cantidad de probetas de concreto.	48
Tabla 14. Normativas para los ensayos de caracterización de los agregados.	51
Tabla 15. Resultados del ensayo de masa unitaria compactada.	52
Tabla 16. Granulometría del agregado fino.	52
Tabla 17. Porcentaje de humedad del agregado fino.	54
Tabla 18. Porcentaje de humedad del agregado grueso.	54
Tabla 19. Resultados de la caracterización de los agregados.	54
Tabla 20. Contenido de aire.	56
Tabla 21. Resistencia de la mezcla de concreto.	57
Tabla 22. Contenido de agregado grueso.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 23. <i>Total, materiales para la mezcla.</i>	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 24. Volumen de concreto necesario para la realización de probetas.	60
Tabla 25. Volumen total de PET.	61

Tabla 26. Cantidad de probetas de concreto.	62
Tabla 27. Cantidad de material para elaborar las probetas con 0% de fibra de PET.	62
Tabla 28. Cantidad de material para elaborar las probetas con 3% de fibra de PET.	63
Tabla 29. Cantidad de material para elaborar las probetas con 5% de fibra de PET.	63
Tabla 30. Resultados de asentamiento.	65
Tabla 31. Resistencia a la compresión de los concretos a los 7 días.	67
Tabla 32. Resistencia a la flexión de los concretos a los 7 días.	67
Tabla 33. Resistencia a la compresión de los concretos a los 14 días.	68
Tabla 34. Resistencia a la flexión de los concretos a los 14 días.	69
Tabla 35. Resistencia a la compresión de los concretos a los 21 días.	69
Tabla 36. Resistencia a la flexión de los concretos a los 21 días.	70
Tabla 37. Resistencia a la compresión de los concretos a los 28 días.	71
Tabla 38. Resistencia a la flexión de los concretos a los 28 días.	71
Tabla 39. Resultados promedio de resistencia a la compresión de los concretos.	72
Tabla 40. Resultados promedio de resistencia a la flexión de los concretos.	74
Tabla 41. Masa de los tipos de concreto.	76
Tabla 42. Resultados de ensayos para agregado grueso.	87
Tabla 43. Resultados de ensayos para agregado fino.	87
Tabla 44. Parámetros iniciales de grava y arena.	91
Tabla 45. Valores de asentamiento recomendados para diferentes estructuras.	91
Tabla 46. Contenido aproximado de aire en el concreto para varios grados de exposición. ...	92
Tabla 47. Contenido total de aire para concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo.	93
Tabla 48. Valores de b/bo para diferentes módulos de finura de la arena y TMN de la grava.	94
Tabla 49. Variables de diseño para un concreto de 12 Mpa según la ACI.	95
Tabla 50. Cantidad de material para un volumen de 0,428 m ³	96

Índice de figuras

Figura 1. PET recolectado para el proceso de reciclaje.	19
Figura 2. Tipos de falla del concreto.	47
Figura 3. Ensayo de flexión para el concreto según la ASTM C293.	47
Figura 4. Marca de cemento utilizado.	55
Figura 5. Fibra de PET	55
Figura 6. Contenido de agua kg/m^3 (método ACI).	57
Figura 7. Relación a/mc.	58
Figura 8. Proceso de mezclado e incorporación de las fibras de PET a la mezcla.	64
Figura 9. Ensayo de asentamiento según la NTC 396.	64
Figura 10. Proceso de elaboración de las probetas.	65
Figura 11. Procesos de desencofrado y curado de las probetas.	66
Figura 12. Montaje de las probetas para los ensayos de resistencia a flexión y compresión. ...	66
Figura 13. Evolución de la resistencia a la compresión de los concretos.	72
Figura 14. Evolución de la resistencia a la flexión de los concretos.	74
Figura 15. Fallas del concreto base, con 3% y 5% de fibra de PET respectivamente.	75
Figura 16. Masa de los diferentes tipos de concreto.	76
Figura 17. Restricciones al TMN por las dimensiones del elemento.	92

Índice Anexos

Anexo A. Ensayos realizados según norma y resultados obtenidos	87
Anexo B. Ensayo de masa unitaria para agregado grueso.	88
Anexo C. Ensayo de módulo de finura para agregado fino.	89
Anexo D. Ensayo de contenido de humedad para agregado grueso y fino.	90
Anexo E. Diseño de mezcla.	91
Anexo F. Ensayo de resistencia a flexión.	99
Anexo G. Ensayo de resistencia a compresión.	102

Introducción

La construcción ha sido uno de los sectores más dinámicos en los últimos años y un impulsor de la economía nacional (Intecnova, 2021). Es evidente el gran aumento de la población en las ciudades, zonas rurales; asimismo, cada persona busca tener una mejor calidad de vida y satisfacer sus necesidades básicas como la vivienda; con esto, se genera una mayor dinámica en el sector de la construcción, refiriéndose más exactamente a la realización de todo tipo de obras civiles como de edificios, viviendas, hospitales, colegios, universidades, etc.

El desarrollo de la construcción ha estado siempre ligado a la disponibilidad de los materiales y de las técnicas que han determinado sus características y escala. De hecho, puede analizarse su evolución considerando sólo cómo y con qué se han construido los edificios (Fernández, 2013). El aumento de la explotación de materia prima para la construcción es claro y cada vez se busca una mejor eficiencia en la producción de estos materiales, por esta razón se han creado elementos muy útiles como los prefabricados de concreto, pero, desafortunadamente, hoy en día la mayoría de los procesos de producción convencionales son poco eficientes y generan conflictos a la hora de producir materiales de construcción como los elementos prefabricados, esto hace que cada vez se requiera una mejora en el proceso de producción y elaboración.

Según cifras del DANE, en 2018 se construyeron 4.561.478 metros cuadrados con prefabricados industrializados a nivel nacional, siendo el segundo sistema constructivo más utilizado del país, con una participación del 30%. (CAMACOL, 2016). Considerando el impacto que tiene la producción de este tipo de elementos, el objetivo de este trabajo investigativo tiene como finalidad mejorar la mezcla de concreto para elementos prefabricados, reemplazando un porcentaje volumétrico de agregado con elementos reciclados de plásticos PET; con esto se busca aumentar la resistencia a la compresión en un tiempo menor a lo habitual (menos a 28 días), a la vez que se hace uso de materiales reciclados, contribuyendo con el cuidado del medio ambiente al aplicar un método de producción más sostenible. Este documento presenta la propuesta de diseño de un nuevo material eficiente, sostenible y

resistente, asimismo describe la metodología correspondiente para el desarrollo y solución de los objetivos planteados.

1. Resumen del proyecto

El presente trabajo de investigación consiste en evaluar la evolución de resistencia a la compresión y tracción en una mezcla de concreto convencional para prefabricados mediante la implementación de fibras de PET o Tereftalato de polietileno reciclado en el diseño de la mezcla a lo largo de su proceso de curado, con el objetivo de minimizar el tiempo de producción de estos materiales y garantizando que su resistencia sea la adecuada según lo establecido por la norma. Para esto, fue necesario hacer una recolección de materiales como la fibra de PET, agregados y cemento, y posteriormente una caracterización de estos mediante la implementación de ensayos de laboratorio de acuerdo con las normas correspondientes para cada caso, según los reglamentos colombianos. La metodología se desarrolló en los límites de tiempo establecidos según el cronograma, comenzando con el diseño de mezcla mediante el método ACI 211.1.74; la incorporación de la fibra de PET se realizó a partir de una sustitución volumétrica del 5% y 3% del contenido de agregado grueso o grava en la mezcla de concreto; posteriormente se realizaron ensayos de resistencia a la compresión y flexión en probetas del material a lo largo del proceso de curado. Mediante una compilación exhaustiva de diferentes ensayos y pruebas de resistencia, se pudo comprobar la viabilidad de la utilización de estas fibras, alcanzando la resistencia de diseño del concreto (12 MPa) a los 7 y 14 días de curado, para los concretos con 5% y 3% de fibra respectivamente. Cabe resaltar que, en los dos casos, la resistencia final a los 28 días fue superior a la resistencia de diseño.

1.1. Descripción del problema

En la gran mayoría de empresas o plantas de producción de elementos prefabricados a base de concreto hidráulico se ha evidenciado que, durante el proceso de manufactura y producción de estos materiales, el tiempo de fraguado se relaciona directamente con la resistencia máxima a esfuerzos que alcanza el producto final (prefabricados), es entonces, donde la mezcla base (estándar) tarda 28 días en alcanzar su resistencia máxima (como cualquier tipo de concreto hidráulico estándar) según lo explicado por Carreño Bustos, A., (2015). Por esta razón se busca que las empresas puedan ser mayormente productivas en el mercado actual, por lo que con esta investigación se pretende reducir el tiempo de producción del material, dado que este es un

factor que disminuye la disponibilidad de planta, pues el tiempo de curado del concreto que garantiza la producción de materiales óptimos para su aplicación en obra, implica almacenar y curar los productos por al menos 28 días y el espacio de bodegaje se reduce y por consiguiente limita la producción de cualquier empresa en el mercado creciente actual. Esta investigación busca mejorar la producción de prefabricados con una reducción de tiempo o un periodo menor de producción, mediante el implemento de fibras de PET en las mezclas convencionales utilizadas, siendo el PET, un elemento sostenible (al ser reciclado para su uso) el cual tiene ventajas en su costo y su manejabilidad.

Tomando como punto de partida que la adición del PET a la mezcla sería en fibras, se contempla que estas aporten mayor resistencia a esfuerzos de flexión y compresión, por ende, su implementación podría generar resultados óptimos de dureza y flexibilidad en los bloques de concreto en general (o prefabricados) en menor tiempo cuando el concreto endurezca después de su colocación, es decir que, la adición de fibras de PET podría acelerar el proceso de curado, lo que implicaría que los bloques de concreto alcanzan su resistencia óptima en un período de tiempo más corto, generando mejoras en las propiedades físico-mecánicas de los materiales y aumentando significativamente la producción en la planta, posiblemente hasta en un 50%.

1.1.1. Formulación del problema

¿Se podría mejorar la producción de elementos prefabricados de concreto hidráulico con una mezcla de concreto más eficiente, reforzada con fibras de PET reciclado, teniendo en cuenta como principal factor el tiempo requerido para que estos elementos alcancen la resistencia necesaria para ser aplicados en obra?

1.2. Justificación

Esta investigación tiene como finalidad determinar un diseño de mezcla de concreto eficiente para la manufactura de elementos para la construcción de prefabricados en concreto, capaz de garantizar la resistencia especificada en un periodo de fraguado menor a lo habitual, generando

una mejor eficiencia productiva y una mayor disponibilidad de espacio en la planta de producción al tener una alta rotación en los productos.

La nueva mezcla debe proporcionar al consumidor elementos resistentes y duraderos que proporcionen seguridad en su utilización, la cual se rige bajo los estándares que establecen las normas vigentes en Colombia para el desarrollo de elementos prefabricados en concreto, como son la NTC 4076 (1997), para elementos prefabricados no estructurales y la NTC 4026 (1997), para elementos prefabricados estructurales. Con todo esto, se busca obtener materiales de construcción que estén enmarcados dentro de la norma que generen condiciones normales para su distribución y aplicación, garantizando su resistencia, dureza, geometría y aspecto físico del producto final. Los recursos físicos, humanos y económicos por parte de la universidad Mariana, generan solidez a la investigación, además de generar un impacto en el desarrollo de la construcción al implementar materiales reciclables. Claramente el alcance de este proyecto es brindar beneficios en modelos o métodos constructivos a menor precio, con estándares de alta calidad y amigables con el medio ambiente.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Elaborar una mezcla de concreto reforzado con fibras PET reciclado, con el fin de mejorar las propiedades físico-mecánicas del material, obteniendo resistencias a la compresión y flexión más tempranas que lo convencional establecido por la norma.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar una mezcla de concreto con una resistencia de 12 MPa para la producción de materiales prefabricados mediante el método ACI 211.
- Incorporar fibras de PET reciclado a la mezcla de concreto previamente diseñada en diferentes porcentajes.

- Elaborar probetas de concreto incorporado con fibras de PET y de concreto convencional como referencia.
- Evaluar la resistencia de las probetas de concreto a lo largo del proceso de curado mediante ensayos de compresión y flexión, para definir el tipo de mezcla que mejor garantice cada una de las propiedades físicas y mecánicas del concreto.

1.4. Marco referencial

1.4.1. Marco contextual

Uno de los materiales fundamentales para la solución de esta investigación es el PET (Figura 1), considerado un material de alta demanda para el reciclaje según lo indicado por Ecoembes (2021). Además, se debe tener en cuenta que, la agricultura, la obra civil y el sector del automóvil son grandes consumidores de plástico reciclado, de acuerdo a lo explicado por Redes, L. (2019). En el caso de la agricultura se obtienen diferentes 'films' para cultivos, mallas para dar sombra en los invernaderos, cordeles, maceteros o semilleros, entre otros productos. En el sector de la obra civil el plástico reciclado se utiliza principalmente en productos de aislamiento e impermeabilización, como planchas y paneles de aislamiento térmico y acústico, láminas de impermeabilización de cubiertas, tejados, suelos, cimientos o perfiles de ventanas y cerramientos. También es muy frecuente su uso en tuberías de saneamiento y tubos de conducción de cables (Gr, 2019).

Figura 1.

PET recolectado para el proceso de reciclaje.



Fuente: Revista Semana 2019

La disponibilidad de este material es potencial y su adquisición es económica a comparación de los materiales que normalmente se utilizan en una mezcla de concreto. En esta investigación se tiene la hipótesis de alcanzar una resistencia más temprana en una mezcla de concreto, en un tiempo menor a lo convencional (28 días) adicionando cierta cantidad de PET directamente en la mezcla.

Una de las deficiencias en la producción de materiales prefabricados a base de concreto es el tiempo; para que una mezcla de concreto llegue a su resistencia óptima normalmente necesita un periodo de 28 días, esto implica que la producción de material no avance eficazmente. Por esto, en esta investigación se busca una mejora en cuanto a esta desventaja del concreto, agregando fibra de PET en diferentes cantidades. Se tiene como finalidad disminuir el periodo de tiempo en alcanzar la resistencia máxima, logrando una mayor eficiencia de producción de materiales prefabricados.

La convicción de desarrollar esta investigación involucra la utilización de herramientas de laboratorio tales como la maquina universal para determinar la resistencia a la compresión de los elementos hechos a base de concreto, asimismo se desarrollarán muestras de mezclas de concreto donde se requiere la utilización de materiales reciclados (PET).

1.4.2. Marco teórico

Esta investigación consiste en la elaboración de un mismo tipo de concreto hidráulico, utilizando un método de diseño convencional (ACI 211), posteriormente se realizan ensayos y pruebas de resistencia a los testigos producidos; para esto es necesario definir algunas variables y elementos que se describen a lo largo de toda la actividad.

1.4.2.1. Material PET. El PET, que responde a las siglas en inglés de tereftalato polietileno, es un tipo de plástico fuerte, flexible y, además, 100% reciclable, usado para fabricar envases y tejidos sintéticos. Este polímero pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres y es un derivado del petróleo. (Ecoembes, 2021).

El Polyethylene Terephthalate, ampliamente conocido como PET, es un polímero plástico que se elabora a partir de un proceso de polimeración de ácido tereftálico y monoetilenglicol. Este material se fabrica en diferentes formatos y puede transformarse mediante distintos procesos de extrusión, inyección e incluso por termoformado. En la actualidad, el material acrílico PET se convierte en uno de los termoplásticos más rígidos y resistentes del mercado, siendo la transparencia y la cristalinidad una de sus características más preciadas. (Servei Estacio, s.f.).

Según Servei Estació (2021), las propiedades del polietileno tereftalato son infinitas, entre las que se destacan:

- Un material de gran dureza y rigidez, que puede utilizarse en contacto con alimentos debido a sus características de no toxicidad.
- Una gran transparencia, aunque admite también distintas cargas de colorantes.
- Este tipo de material plástico o acrílico adquiere una muy buena resistencia química. Por lo que, puede entrar en contacto con diferentes disolventes y aceites sin estropearse.
- Además, obtiene una amplia resistencia al desgaste, a los impactos y a la rotura
- Se convierte en un producto ignífugo, es decir, que rechaza la combustión y se protege contra el fuego.
- Es, gracias a su composición, un plástico totalmente reciclable y respetuosos con el medio ambiente.

1.4.2.2. Concreto. El Concreto es una mezcla de piedras, arena, agua y cemento que al solidificarse constituye uno de los materiales de construcción más resistente para hacer bases y paredes. La combinación entre la arena, el agua y el cemento en algunos países latinoamericanos se le conoce como mortero, mientras que cuando el concreto ya está compactado en el lugar que le corresponde recibe el nombre de hormigón. (Yirda, 2021).

Se considera al concreto como un material ampliamente utilizado; es usado en la gran mayoría de obras civiles y es un material que tiene muchas ventajas en la construcción, siendo capaz de

resistir grandes cargas en compresión. Se considera que en una construcción este es el ítem o el material más costoso.

1.4.2.2.1. Propiedades del concreto. Las propiedades del concreto son sus características o cualidades básicas. Las cuatro propiedades principales del concreto son: TRABAJABILIDAD, COHESIVIDAD, RESISTENCIA Y DURABILIDAD. (IMCYC, 2004).

El concreto puede variar sus propiedades dependiendo del tipo y diseño de la mezcla, esto mediante la variación y dosificación de sus componentes básicos (agua, cemento y agregados). En una obra civil o en cualquier tipo de construcción es el material más fundamental y utilizado en todo tipo de elementos como estructurales, mampostería y terminados.

1.4.2.2.2. Trabajabilidad. La trabajabilidad del concreto normalmente está ligada a la fluidez o consistencia que se mide a través de la prueba de asentamiento. Por lo regular se considera que un concreto más fluido es más trabajable y uno con menos fluidez tiene menos trabajabilidad (CEMEX, s.f.).

La fluidez de un concreto va a depender del contenido de agua que tenga la mezcla, a su vez, la cantidad de agua en la mezcla definirá la resistencia a la compresión final que va a resistir el elemento de concreto.

1.4.2.2.3. Cohesividad. La cohesividad se define como aquella propiedad gracias a la cual es posible controlar la posibilidad de segregación durante la etapa de manejo de la mezcla, al mismo tiempo que contribuye a prevenir la aspereza de la misma, y facilitar su manejo durante el proceso de compactación del concreto (Chinga García, Boulanger Neira, & Rumiche Chavez, 2015).

1.4.2.2.4. Resistencia. La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto. Se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm², MPa y con alguna frecuencia

en libras por pulgada cuadrada (psi). (CEMEX, 2019). Según la NTC 4026, la resistencia a la compresión para materiales prefabricados debe estar en un intervalo de 8 MPa a 13 MPa.

Para determinar la resistencia a la compresión alcanzada en una mezcla de concreto, se dejan testigos cilíndricos elaborados con el mismo material, los cuales son curados y sometidos a ensayos de compresión en máquina universal, CEMEX (2019) como productor de cementos indica que en la mayoría de los países la edad normativa en la que se mide la resistencia mecánica del concreto es la de 28 días, aunque hay una tendencia para llevar esa fecha a los 7 días. Es frecuente determinar la resistencia mecánica en periodos de tiempo distinto a los de 28 días, pero suele ser con propósitos meramente informativos. Las edades más usuales en tales casos pueden ser: 1, 3, 7, 14, 90 y 360 días. En algunas ocasiones y de acuerdo a las características de la obra, esa determinación es normativa, fijado así en las condiciones contractuales.

1.4.2.2.5. Durabilidad. La durabilidad es la capacidad del concreto para resistir acciones físicas, químicas, biológicas y climáticas. Una estructura durable es aquella cuya vida de servicio puede ser mayor a los 50 años; incluso, en algunos países se han diseñado estructuras de concreto con vidas útiles de 80 a 100 años. (Ramírez, 2020).

1.4.2.3. Agregados. El agregado es un material granular (arena, grava, piedra triturada o escoria) usado con un medio cementante para formar concreto o mortero hidráulico. Puede utilizarse en su estado natural o bien, triturado, de acuerdo con su uso y aplicación. (CEMEX, s.f.)

Para la elaboración de concreto, usualmente se utilizan dos tipos de agregado: el agregado fino (material granular que pasa por la malla del tamiz #4) y el agregado grueso (material granular que se retiene en la malla del tamiz #4). Para la elaboración de materiales prefabricados se utilizan agregados con una granulometría pequeña.

Los agregados finos como la arena se extraen desde minas o del fondo de los ríos y el agregado grueso se extrae de ríos (grava) y canteras de roca (triturado).

1.4.2.4. Cemento. El cemento es el material de construcción más utilizado en todo el mundo. Este material es un polvo fino, obtenido de la calcinación a una temperatura que puede llegar a alcanzar los 1,450 grados centígrados de una mezcla compuesta por piedra caliza, arcilla y mineral de hierro. El producto del proceso de calcinación se denomina clínker, que, al ser triturado con yeso, adiciones y aditivos químicos, resulta en cemento apto para la construcción. (CANACEM, SF)

Según CEMEX (SF), algunas de las propiedades de los productos basados en cemento son:

- **Hidráulicas:** La reacción de la hidratación entre el cemento y el agua es única: el material fragua y luego se endurece. La naturaleza hidráulica de la reacción permite que el cemento hidratado se endurezca aún bajo el agua.
- **Estéticas:** Antes de fraguar y endurecerse, el cemento hidratado presenta un comportamiento plástico. Por lo tanto, se puede vaciar en moldes de diferentes formas y figuras para generar arquitecturas estéticamente interesantes, que serían difíciles de lograr con otros materiales de construcción.
- **De durabilidad:** Cuando se usa correctamente en diseño de mezclas de concreto, el cemento puede formar estructuras con una vida de servicio larga que soporte los cambios climáticos extremos y agresiones de agentes químicos.
- **Acústicas:** Utilizados con un diseño adecuado, los materiales basados en cemento pueden servir para un excelente aislamiento acústico.

1.4.2.4.1. Tipos de cemento. Entre los tipos de cemento se encuentran:

- **Cemento Portland.** Se denomina así por su color, parecido al de las piedras calizas de la ciudad de Portland en Oregón, este tipo de cemento se clasifica según el tipo y su utilización (CEMEX, 2019):

✓ **Cemento Tipo I:** Uso general.

Apropiado para todos los usos donde no se requiere las propiedades específicas de otros cementos. Su empleo en concreto incluye pavimentos, pisos, puentes, tanques, embalses, tuberías, unidades de mampostería y productos de concreto prefabricado entre otras cosas.

✓ **Cemento Tipo II y Tipo II (MH):** Moderada resistencia a sulfatos y al calor de hidratación.

Se puede utilizar en estructuras normales y en miembros expuestos a suelos o agua subterránea donde la concentración de sulfatos o el calor proveniente de la hidratación sean más altos de lo normal pero no severos. Este cemento tiene propiedades de moderada resistencia a sulfatos porque contiene no más del 8% de aluminato tricálcico. Para controlar el ataque al concreto se debe emplear el cemento tipo II acompañado de uso de baja relación agua - material cementante y baja permeabilidad.

✓ **Cemento Tipo III:** Altas resistencias iniciales.

Ofrece alta resistencia a edades tempranas, normalmente una semana o menos. Este es similar al cemento Tipo I a excepción de que sus partículas se muelen más finamente, por lo que es usado cuando se necesita remover las cimbras (encofrados) lo más temprano posible o cuando la estructura será puesta en servicio rápidamente.

✓ **Cemento Tipo IV:** Para lograr bajo calor de hidratación.

Se usa donde se deba minimizar la tasa y cantidad de calor generado por la hidratación. Por lo tanto, este cemento desarrolla la resistencia en una tasa más lenta que los otros tipos. Se puede usar en estructuras de concreto masivo donde la alta

temperatura deriva del calor generado durante el endurecimiento y este deba ser minimizado.

✓ **Cemento Tipo V:** Alta resistencia a sulfatos.

Se utiliza en concretos expuestos a la acción severa de sulfatos, principalmente donde el suelo y el agua subterránea contienen gran concentración de estos. La alta resistencia a los sulfatos de este cemento se atribuye al bajo contenido de aluminato tricálcico, no excediendo el 5%. El uso de baja relación materiales cementantes y baja permeabilidad son fundamentales para el buen desempeño de cualquier estructura expuesta a los sulfatos. De lo contrario, incluso el concreto con cemento tipo V es incapaz de soportar una exposición severa a los sulfatos.

- **Cemento hidráulico.** Se refiere a cualquier tipo de cemento que endurece al combinarse con agua. Este material es una mezcla de agregados: naturales, procesados o artificiales, cemento y agua (a la que además se le pueda añadir algunos aditivos). (REINAR SA, 2017).

Los cementos hidráulicos, debido a su gran resistencia, son ideales para ser utilizados en construcciones donde los climas son húmedos, estructuras portuarias y aplicaciones donde exista gran humedad o incluso contacto directo con agua. Existen diversos tipos de cemento hidráulico, tales como: Tipo GU, Tipo HE, Tipo MS, Tipo HS, Tipo MH y Tipo LH.

✓ **Tipo GU:** Uso general.

Según la revista educativa CursosOnlineWeb.com, este tipo de cemento hidráulico es utilizado para todas las aplicaciones donde las propiedades especiales de los otros tipos no sean necesarias. Suele ser utilizado en pisos, tubería, pavimentos, edificios en concreto armado, puentes, productos de concreto prefabricado y en muchas aplicaciones más donde se usa el cemento portland tipo I.

✓ **Tipo HE:** Estructural.

El cemento hidráulico tipo HE tiene una gran resistencia en edades tempranas, por lo regular menos de una semana. Este tipo de cemento es utilizado de la misma forma que el cemento portland tipo III.

✓ **Tipo MS:** Moderada resistencia a sulfatos.

Este tipo de cemento hidráulico es regularmente empelado donde las precauciones son importantes contra el ataque moderado por los sulfatos, tales como en estructuras de drenaje, donde las concentraciones de sulfatos en el agua subterráneo son mayores que lo normal pero no llegan a ser severas. El cemento tipo MS es utilizado de la misma forma que el cemento portland tipo II, y al igual que este es necesario que sea preparado el concreto de cemento tipo MS con baja relación de agua materiales cementantes para que se garantice la resistencia a los sulfatos.

✓ **Tipo HS:** Alta resistencia a sulfatos.

El cemento hidráulico tipo HS es usualmente empleado en concreto que se expone a la acción severa de los sulfatos, principalmente donde el suelo o el agua subterránea tienen altas concentraciones de sulfato. Este tipo de cemento es usado de la misma forma que el cemento portland tipo V.

✓ **Tipo MH:** Moderado calor de hidratación.

El cemento hidráulico tipo MH se utiliza donde el concreto requiera tener un calor de hidratación moderado y necesite tener control del aumento en la temperatura. Por lo regular se utiliza de la misma forma que el cemento portland de moderado calor tipo II.

✓ **Tipo LH:** Bajo calor de hidratación

Este tipo de cemento es usado donde la tasa y la cantidad del calor que se genera a causa de la hidratación necesite ser minimizadas. Este cemento hidráulico desarrolla su resistencia en una tasa más lenta que las demás sustancias. El cemento tipo LH suele ser aplicado en estructuras de concreto masivo donde se el aumento de la temperatura que resulta del calor generado durante el endurecimiento debe ser minimizado. Este es usado de la misma forma que el cemento portland tipo IV.

1.4.2.5. Máquina universal. En ingeniería se denomina máquina universal a una máquina semejante a una prensa con la que es posible someter materiales a ensayos de tracción y compresión para medir sus propiedades. La presión se logra mediante placas o mandíbulas accionadas por tornillos o un sistema hidráulico. Esta máquina es ampliamente utilizada en la caracterización de nuevos materiales. (Wikipedia, s.f.). La utilización de esta máquina abarca ensayos de tracción, ensayos de compresión, ensayo horizontal y ensayo de tracción hidráulica.

1.4.3. Marco legal

La NTC 4076 (1997), indica en el apéndice 4.2 la resistencia a la compresión para unidades de mampostería NO ESTRUCTURALES, ordenadas en la Tabla 1.

Tabla 1.

Requisito de resistencia a la compresión para mampostería no estructural.

Resistencia a la compresión a los 28 días (Rc28), evaluada sobre el área neta promedio	
Mínimo (MPa)	
Promedio 3 unidades	Individual
6	5

Fuente: NTC 4076

La NTC 4026 (1997), indica en el apéndice 4.2 la resistencia a la compresión para unidades de mampostería ESTRUCTURALES, ordenadas en la Tabla 2.

Tabla 2.

Requisitos de resistencia a la compresión para mampostería estructural.

Clase	Resistencia a la compresión a los 28 días, evaluada sobre el área neta promedia (Anp)		Absorción de agua (Aa)% según el peso(densidad) del concreto secado en horno		
	Mínimo, MPa		Promedio de 3 unidades máximo, %		
	Promedio de 3 unidades	individual	Peso liviano menos de 1680 kg/m ³	Peso mediano de 1680kg/m ³ hasta menos de 2000 kg/m ³	Peso normal 2000 kg/m ³ o mas
Alta	13	11	15%	12%	9%
Baja	8	7	18%	15%	12%

Fuente: NTC 4026.

1.5. Estado de arte

A causa del crecimiento exponencial de las ciudades y poblaciones, se ha generado una alta demanda de elementos prefabricados para la construcción, al ser estos elementos ligeros en su fabricación y manipulación, permitiendo así avance de obra de manera rápida y segura. Los materiales convencionales que usualmente se utilizan como el ladrillo quemado, generan un gran impacto ambiental por su metodología de producción, en Colombia y en el resto del mundo, cada día se busca mitigar este tema y se busca implementar nuevos materiales capaces de remplazar lo convencional por lo innovador con resultados más eficientes y sobre todo más amigables con el medio ambiente. A razón de todos estos factores se ha realizado diferentes investigaciones que corresponden a la utilización de materiales plásticos reciclados; la organización ecologista internacional sin fines de lucro Greenpeace, publicó un artículo científico denominado “Situación actual de los plásticos en Colombia y su impacto en el medio ambiente” (Greenpeace, 2019), el cual describe el impacto de los plásticos en el medio ambiente colombiano y donde se contempló: (i) hacer una revisión normativa sobre el manejo de los plásticos; (ii) analizar, bajo el enfoque de la economía circular, el comportamiento que tiene el

mencionado material; (iii) conocer la gestión pública en la temática propuesta y; (iv) describir algunas de las principales problemáticas que estos últimos generan en el ambiente. Con esto se presenta la necesidad de la reutilización de materiales reciclables en cualquier tipo de industria, más exactamente del PET.

Este trabajo investigativo parte de una hipótesis basada en resultados empíricos, al someter el producto obtenido a pruebas de resistencia, y evaluando bajo la normatividad que rige en Colombia para este tipo de elementos, implementando un material disponible y económico (PET) y a la vez aportando al cuidado del medio ambiente.

Algunas investigaciones similares que se pueden considerar como referencia son:

1. En la Universidad Católica de Colombia, en el año 2019 se desarrolló la investigación “Caracterización del comportamiento mecánico del concreto simple con adición de fibras poliméricas recicladas PET”, donde se analiza el comportamiento mecánico del concreto con la adición de fibras PET o polímeros reciclables mediante ensayos de resistencia a los 7 y 28 días de curado, en esta investigación se evidencia que las fibras de PET logran aumentar la resistencia de un concreto convencional hasta un determinado límite de adición; se obtuvo que, después de un máximo de material PET, el concreto disminuye drásticamente su resistencia. “Sobre el uso de las fibras en el concreto es evidente que la eficacia de las fibras ya sea de vidrio, polímeros, caucho de miga, PET entre otras radica en un porcentaje de adición a la mezcla específico el cual no debe ser sobrepasado para que las fibras cumplan su función y mejoren las características del concreto” (PÉREZ, 2019).
2. El estudio realizado en la Universidad de Cartagena en el 2020 denominado “Estudio del comportamiento mecánico del concreto con adición de fibras de politeraftalato de etileno (PET)” donde se incorporó material reciclado en mezclas de concreto convencional y se determinó que las botellas de PET no solo tienen potencial para ser usados como fibras, sino que también pueden ser usados en forma de escamas o pellets, y que dichas fibras mejoran la resistencia a flexión de un 10 a un 30%, pero producen

una ligera caída en la resistencia a compresión. “Es por esto que no pueden ser usada bajo ningún criterio como elemento estructural.” (SEGRERA LEÓN & COAVAS TEJADA, 2020)

Actualmente existen diferentes procesos con agregados PET en la elaboración de prefabricados en concreto, siendo la materia de estudio la mezcla capaz de generar diferentes variables según la proporción y distribución, en esta investigación se evaluara la adición de fibras de PET con variación en los porcentajes de intervención en la mezcla base, evaluando así la resistencia a la compresión y flexión, aspecto y geometría más conveniente para ser utilizada en el mercado de acuerdo a lo que establece la NTC 4076 como una mezcla de concreto para la elaboración de materiales prefabricados.

1.6. Metodología

Esta parte del documento permite conocer un paso a paso del procedimiento de cada una de las actividades desarrolladas en la investigación.

1.6.1. Diseñar una mezcla de concreto de 12 MPa

Para el diseño de la mezcla para prefabricados se debe utilizar una resistencia de 12 Mpa (ACI, 2000), por lo tanto, para su diseño se adopta esta característica y se realiza el paso a paso del diseño de mezclas secas según lo establece el ACI 211.1.74, a partir de una hoja electrónica. Este se muestra como anexo (Anexo E).

1.6.1.1. Caracterización de agregados. Para el diseño de una mezcla de concreto que cumpla con los requerimientos de resistencia establecidos, es necesario determinar ciertas características de los agregados que influyen directamente en las variables de diseño del concreto, para determinar estas características se deben realizar ensayos de laboratorio de acuerdo a las normatividades vigentes y correspondientes en cada caso.

1.6.1.1.1. Agregados finos

- **Granulometría y módulo de finura.** Este ensayo se realiza de acuerdo con lo descrito en la NTC 174, donde se indica el procedimiento para realizar el proceso de tamizado que conlleva a los resultados de granulometría de la muestra evaluada. Para el ensayo de granulometría se selecciona una muestra de material fino con una masa hasta de 3 Kg, la cual se somete a un proceso de tamizado mecánico o manual entre las mallas N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100 respectivamente.

Luego de realizar el proceso correspondiente de tamizado, se organizan los datos obtenidos y se calcula el módulo de finura mediante la siguiente ecuación:

$$MF(\%) = \frac{\% \text{ Retenido acumulado}}{100}$$

Ecuación 1: Módulo de finura.

- **Densidad y absorción de los agregados finos.** La NTC 237 indica el procedimiento para determinar la densidad y absorción la una muestra de agregado fino para concreto. La densidad es la masa por unidad de volumen. Los calificativos nominal o aparente se refieren a la forma de tomar el volumen del cuerpo, puesto que las partículas de los agregados para el concreto tienen porosidad; esa porosidad puede ser saturable o no saturable. Si se toma el volumen externo, el aparente, la densidad calculada será aparente; si del volumen aparente se elimina la porosidad saturable, la densidad se llama nominal, y si además de la porosidad saturable se elimina la porosidad no saturable, el volumen resultante es de material puro, y por lo tanto el cociente de la masa y ese volumen será la masa, sin calificativos. En este diseño de mezcla se utilizó la densidad del material seco mediante la siguiente ecuación:

- ✓ **Densidad aparente:** Se calcula la densidad aparente a 23 °C, como se define en la NTC 385 (Terminología Relativa Al Concreto y Sus Agregados), así:

$$Ds \text{ aparente} = \frac{0.9975 * A}{B + S - C}$$

Ecuación 2: Densidad aparente.

Donde:

Ds = Densidad aparente, [g/cm³].

A = Masa en el aire de la muestra secada al horno, [g].

B = Masa del picnómetro lleno con agua, [g].

S = Masa de la muestra saturada y superficialmente seca, [g].

C = Masa del picnómetro con la muestra y agua hasta la marca de calibración, [g].

- ✓ **Densidad aparente (base saturada y superficialmente seca):** Se calcula la densidad aparente a 23 °C, sobre la base del agregado saturado y superficialmente seco así:

$$Ds \text{ aparente (base sss)} = \frac{0.9975 * S}{B + S - C}$$

Ecuación 3: Densidad aparente (base saturada y superficialmente seca).

- ✓ **Densidad nominal:** Se calcula la densidad nominal a 23 °C, como se define en la NTC 385 (Terminología Relativa Al Concreto y Sus Agregados), así:

$$Ds \text{ nominal} = \frac{0.9975 * A}{B + A - C}$$

Ecuación 4: Densidad nominal.

Donde:

Ds = Densidad aparente, [g/cm³].

A = Masa en el aire de la muestra secada al horno, [g].

B = Masa del picnómetro lleno con agua, [g].

S = Masa de la muestra saturada y superficialmente seca, [g].

C = Masa del picnómetro con la muestra y agua hasta la marca de calibración, [g].

- ✓ **Absorción.** La NTC 237 indica el procedimiento y la relación matemática que permite determinar el porcentaje de absorción para una muestra de agregado fino, la ecuación matemática se muestra a continuación:

$$\text{Absorción [\%]} = \frac{S - A}{A} * 100$$

Ecuación 5: Porcentaje de absorción.

- **Contenido de humedad.** Los agregados, al ser materiales porosos tienen la capacidad de retener agua. El agua acumulada en los agregados genera un grado de humedad que puede modificar la relación agua-cemento de una mezcla de concreto, lo que conlleva de manera indirecta a una reducción en la resistencia final. La NTC 1776 indica el procedimiento correspondiente para realizar el ensayo de humedad en agregados finos. De la misma forma, la NTC 1776 indica la siguiente fórmula para el cálculo del porcentaje de humedad:

$$W = \frac{100(H - S)}{S}$$

Ecuación 6: Porcentaje de Humedad.

Donde:

W = Contenido de humedad de la muestra, [%].

H = Masa inicial de la muestra, [g].

S = Masa de la muestra seca, [g].

El contenido de humedad superficialmente es igual a la diferencia entre el contenido total de humedad y la absorción, con todos los valores basados en los pesos secos. (ICONTEC, 1994).

1.6.1.1.2. Agregados gruesos

- **Determinación de masa unitaria.** Se define la masa unitaria como el cociente entre la masa de la muestra suelta y/o apisonado sobre el volumen del recipiente que las contiene; las unidades que definen la masa unitaria normalmente son $[\text{kg}/\text{m}^3]$. Se determinan siguiendo lo estipulado en la normatividad vigente NTC 92, la cual se aplica a materiales en condiciones compactadas o sueltas sin que excedan 150 mm de tamaño máximo nominal con la siguiente ecuación:

$$M = \frac{(G - T)}{V} = (G - T) \times F$$

Ecuación 7: Masa unitaria compactada.

Donde:

M = Masa unitaria del agregado, $[\text{kg}/\text{m}^3]$.

G = Masa del agregado más el molde, $[\text{kg}]$.

T = Masa del molde, $[\text{kg}]$.

V = Volumen del molde, $[\text{m}^3]$.

F = Factor para el molde, $[1/\text{m}^3]$.

- **Densidad y absorción del agregado grueso.** La densidad, básicamente es la masa por unidad de volumen. Para determinar la densidad y la absorción de un agregado grueso, se dispone de la NTC 176 que describe cierto procedimiento experimental para la determinación de dichos valores; la densidad nominal (SSS) y la absorción se basan en el humedecimiento en agua del agregado después de 24 h.

La NTC 176 describe un procedimiento que resumiendo: se escoge una muestra de agregado, la cual se sumerge en agua durante 24 h aproximadamente para saturar los poros. Luego se remueve el agua y se seca la superficie de las partículas, y se determina su masa. Posteriormente, la masa de la muestra es determinada y sumergida en el agua. Finalmente, la muestra es seca al horno y se determina su masa una tercera vez. Se usan

las masas obtenidas y con las fórmulas de este método de ensayo, se calculan tres tipos de densidad y la absorción. Para la determinación de los valores de las diferentes densidades presentes en la muestra, se emplean las siguientes ecuaciones:

✓ **Densidad aparente:**

$$D_{sBulk} = \frac{0.9975 \times A}{(B - C)}$$

Ecuación 8: Densidad aparente.

Donde:

A = Masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno, [g].

B = Masa en el aire de la muestra de ensayo saturada y superficialmente seca, [g].

C = Masa de la muestra de ensayo saturada, [g].

✓ **Densidad Aparente (Saturada y Superficialmente Seca):**

$$D_s \text{ aparente}(\text{saturado} - \text{superficialmente} - \text{seca}) = \frac{0.9975 \times B}{(B - C)}$$

Ecuación 9: Densidad aparente saturada y superficialmente seca.

✓ **Densidad Nominal:**

$$D_s \text{ nominal} = \frac{0.9975 \times A}{(A - C)}$$

Ecuación 10: Densidad nominal.

✓ **Absorción.** Se conoce como absorción, al incremento en masa del agregado debido a la penetración de agua en los poros de las partículas, durante un período de tiempo

prescrito, sin incluir el agua adherida en la superficie de las partículas, expresado como porcentaje de la masa seca.

Para determinar la absorción en porcentaje de la muestra, se emplea la siguiente ecuación:

$$\text{Absorción, \%} = \frac{(B - A)}{A} \times 100$$

Ecuación 11: Porcentaje de absorción.

Donde:

A = Masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno, [g].

B = Masa en el aire de la muestra de ensayo saturada y superficialmente seca, [g].

- **Contenido de humedad.** Los agregados, al ser materiales porosos tienen la capacidad de retener agua. El agua acumulada en los agregados genera un grado de humedad que puede modificar la relación agua-cemento de una mezcla de concreto, lo que conlleva de manera indirecta a una reducción en la resistencia final. La NTC 1776 indica el procedimiento correspondiente para realizar el ensayo de humedad en agregados finos. De la misma forma, la NTC 1776 indica la siguiente fórmula para el cálculo del porcentaje de humedad:

$$W = \frac{100(H - S)}{S}$$

Ecuación 12: Porcentaje de Humedad.

1.6.1.2. Definición del asentamiento. El asentamiento es una medida de la consistencia de concreto, que se refiere al grado de fluidez de la mezcla e indica qué tan seco o fluido está el concreto. (ARGOS, s.f.).

El asentamiento para el diseño de una mezcla se define según la consistencia, el tipo de construcción y su colocación, los asentamientos indicados se establecen en la Tabla 3.

Tabla 3.

Asentamiento del concreto.

Asentamiento (cm)	Consistencia tipo concreto	Grado de trabajabilidad	Tipo de estructura y condiciones de colocación
0-20	Muy seca	Muy pequeño	Vigas o pilote de alta resistencia con vibraciones formales
2,0-3,5	Seca	Pequeño	Pavimentos vibrados con maquina mecánica
3,5-5,0	Semi seca	Pequeño	Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración fundaciones en concreto simple pavimentos con vibradores normales
5,0-10,0	Media	Medio	Losas medianamente reforzadas y pavimentos compactados a mano. Columnas, vigas fundaciones y muros, con vibración
10,0-15,0	Húmeda	Alto	Secciones con muchos refuerzos trabajos donde la colocación sea difícil revestimiento de túneles no recomendable para compactarlo con demasiada vibración

Fuente: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del Concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas, Tomo 1, Tercera edición.

1.6.1.3. Tamaño del agregado. Dependiendo de la aplicación o utilización del concreto, se calcula el tamaño máximo del agregado que va a depender de los tamaños mínimo de las secciones a recubrir con este material como por ejemplo vigas, columnas o zapatas. En el caso de materiales prefabricados dependerá del tipo de elemento prefabricado, teniendo en cuenta las indicaciones de las normatividades correspondientes. En la Tabla 4. se indican los tamaños máximos de los agregados según el tamaño de la construcción:

Tabla 4.

Tamaños máximos de los agregados según el tipo de construcción.

Dimensiones mínimas de la sección (cm)	Tamaño máximo de agregado			
	Muros reforzados vigas y columnas	Muros sin refuerzos	Losas muy reforzadas	Losas sin refuerzos o poco reforzadas
6-15	1/2"-3/4"	3/4"	3/4" - 1"	3/4" - 1 3/4"
19-29	3/4" - 1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2" - 3"
30-74	1 1/2" - 3"	3"	1 1/2" - 3"	3"
75 o mas	1 1/2" - 3"	6"	1 1/2" - 3"	3" - 6"

Fuente: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del Concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas, Tomo 1, Tercera edición.

1.6.1.4. Contenido de agua. El contenido de agua en una mezcla de concreto es una de las partes más fundamentales durante el diseño, dado que la resistencia depende directamente de esta variable. El agua de mezclado depende de la forma del agregado grueso y del contenido de aire que tenga el concreto; para 1m³ de concreto se determina la cantidad de agua mediante la Tabla 5, Tabla 6, Tabla 7 y Tabla 8.

Tabla 5.

Cantidad de agua con partículas de forma redondeada y textura liza, en concreto sin aire incluido.

Asentamiento (mm)	pulg	Tamaño máximo del agregado							
		9,51 3/4"	12,7 1/2"	19 3/4"	25,4 1"	38,1 1 1/2"	50,8 2"	64 2 1/2"	76,1 3"
		Agua de mezclado kg/m ³ de concreto							
0	0	213	185	171	154	144	136	129	123
25	1	218	192	177	161	150	142	134	128
50	2	222	197	183	167	155	146	138	132
75	3	226	202	187	172	160	150	141	136
100	4	229	205	191	176	164	154	144	139
125	5	231	208	194	179	168	156	146	141
150	6	233	212	195	182	172	159	150	143
175	7	237	216	200	187	176	165	156	148
200	8	244	222	206	195	182	171	162	154

Fuente: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del Concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas, Tomo 1, Tercera edición.

Tabla 6.

Cantidad de agua con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto sin aire incluido.

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado							
		9,51 ¾"	12,7 ½"	19 ¾"	25,4 1"	38,1 1 ½"	50,8 2"	64 2 ½"	76,1 3"
(mm)	pulg	Agua de mezclado kg/m ³ de concreto							
0	0	223	201	186	171	158	147	141	132
25	1	231	208	194	178	164	154	147	138
50	2	236	214	199	183	170	159	151	144
75	3	241	218	203	188	175	164	156	148
100	4	244	221	207	192	179	168	159	151
125	5	247	225	210	196	183	172	162	153
150	6	251	230	214	200	187	176	165	157
175	7	256	235	218	205	192	181	170	163
200	8	260	240	224	210	197	186	176	168

Fuente: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del Concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas, Tomo 1, Tercera edición.

Tabla 7.

Cantidad de agua con partículas de forma redondeada y textura liza, en concreto con aire incluido.

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado							
		9,51 ¾"	12,7 ½"	19 ¾"	25,4 1"	38,1 1 ½"	50,8 2"	64 2 ½"	76,1 3"
(mm)	pulg	Agua de mezclado kg/m ³ de concreto							
0	0	188	161	151	134	129	121	119	113
25	1	293	167	157	141	135	127	124	117
50	2	197	172	163	147	140	131	128	122

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado							
		9,51	12,7	19	25,4	38,1	50,8	64	76,1
(mm)	pulg	¾"	½"	¾"	1"	1 ½"	2"	2 ½"	3"
		Agua de mezclado kg/m ³ de concreto							
75	3	200	176	167	152	145	135	132	125
100	4	203	179	169	155	148	137	134	128
125	5	205	183	172	158	151	140	137	130
150	6	208	188	176	162	155	144	141	134
175	7	213	194	181	167	161	150	146	139
200	8	219	201	186	174	167	156	152	144

Fuente: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del Concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas, Tomo 1, Tercera edición.

Tabla 8.

Cantidad de agua con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto con aire incluido.

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado							
		9,51	12,7	19	25,4	38,1	50,8	64	76,1
(mm)	pulg	¾"	½"	¾"	1"	1 ½"	2"	2 ½"	3"
		Agua de mezclado kg/m ³ de concreto							
0	0	198	176	166	152	143	132	130	122
25	1	206	183	174	158	149	138	136	128
50	2	211	189	179	164	155	144	142	134
75	3	216	193	183	169	159	149	146	138
100	4	219	196	186	172	163	152	150	141
125	5	222	200	190	176	177	156	153	144
150	6	226	205	194	180	171	151	157	148
175	7	230	210	199	185	177	166	162	153
200	8	235	215	204	190	182	171	168	158

Fuente: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del Concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas, Tomo 1, Tercera edición.

1.6.1.5. Resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión de diseño debe modificarse de acuerdo con los requerimientos de la mezcla, la resistencia a la compresión de diseño se calcula a partir de la Tabla 9.

Tabla 9.

Resistencia a la compresión de diseño.

Resistencia especificada a la compresión (MPa)	Resistencia promedio requerida a la compresión (MPa)
$f_c < 21$	$f_{cr} = f_c + 7,0$
$21 < f_c \leq 35$	$f_{cr} = f_c + 8,3$
$f_c > 35$	$f_{cr} = 1,10f_c + 5,0$

Fuente: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del Concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas, Tomo 1, Tercera edición.

1.6.1.6. Relación agua-cemento. La relación agua-cemento se determina de acuerdo con la resistencia de diseño, algunos valores de la relación se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10.

Relación agua-cemento.

Resistencia a la compresión kg/cm²	Relación agua cemento en peso		
	límite superior	línea media	límite inferior
140	-	0,72	0,65
175	-	0,65	0,58
210	0,7	0,58	0,53
245	0,64	0,53	0,49
280	0,59	0,48	0,45
315	0,54	0,44	0,42
350	0,49	0,4	0,38

Fuente: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del Concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas, Tomo 1, Tercera edición.

1.6.1.7. Cantidad de cemento. Teniendo la cantidad de agua, la resistencia de diseño y la relación agua-cemento se despeja la cantidad de cemento en kilogramos de la relación encontrada.

1.6.1.8. Cantidad de los agregados. Se calculan las cantidades de agregados para el diseño de 1m³ de concreto a partir del módulo de finura del agregado fino y del tamaño máximo nominal del agregado grueso; con esto se encuentra la relación b que se aplica directamente en los cálculos para la cantidad de agregados. La relación b se determina a partir de la Tabla 11.

Tabla 11.

Relación b

Volumen de agregado grueso seco y compactado con varilla(a) por volumen de concreto para diferente módulo de finura de la arena					
Tamaño máximo nominal del agregado		Módulo de finura de la arena			
Mm	pulg.	2,4	2,6	2,8	3,0
0,5	3/4"	0,5	0,5	0,46	0,44
0,59	1/2"	0,59	0,57	0,57	0,53
0,66	3/4"	0,66	0,64	0,62	0,6
0,71	1"	0,71	0,69	0,67	0,65
0,75	1 1/2"	0,75	0,73	0,71	0,69
0,78	2"	0,78	0,76	0,74	0,72
0,82	3"	0,82	0,8	0,78	0,76
0,87	6"	0,87	0,85	0,83	0,81

Fuente: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del Concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas, Tomo 1, Tercera edición.

1.6.1.9. Cantidad de agregado grueso. Conociendo la variable b y la masa unitaria compactada encontrada con el procedimiento descrito en la NTC 92, se calcula la cantidad de agregado grueso en kilogramos para 1 m³ de concreto con la siguiente relación:

$$W_{gruesos} [kg] = b * Masa\ unitaria\ compactada$$

Ecuación 7: Cantidad de agregado grueso en kilogramos.

1.6.1.10. Cantidad de agregado fino. Con las cantidades calculadas de agua, cemento y agregado grueso se determina el volumen correspondiente de los mismos mediante su densidad; teniendo los volúmenes de los mismos se calcula el volumen de agregado fino mediante la diferencia de los demás volúmenes:

$$V_{finos} = 1 - V_{aga} - V_{cemento} - V_{gruesos}$$

Ecuación 13: Volumen de agregado fino.

1.6.1.11. Ajustes de agua. El ajuste de agua se realiza con el propósito de no cambiar la relación agua-cemento responsable de la resistencia en un concreto, los materiales finos y gruesos al encontrarse en la naturaleza pueden contener agua retenida y humedad producto de las precipitaciones u otros factores; con todo esto el ajuste de agua se realiza con la siguiente ecuación:

$$W_{ag-aj} = W_{agua} + \left(W_{finos} \frac{\%Abs}{100} + W_{gruesos} \frac{\%Abs}{100} \right) - \left(W_{finos} \frac{\%Hm}{100} + W_{gruesos} \frac{\%Hm}{100} \right)$$

Ecuación 14: Porcentaje de absorción.

Donde:

W_{ag-aj} = Peso de agua ajustado [Kg].

W_{agua} = Peso de agua sin ajustar [Kg].

W_{finos} = Peso del agregado fino [Kg].

$W_{gruesos}$ = Peso del agregado grueso [Kg].

%Abs = Porcentaje de absorción.

%Hm = Porcentaje de humedad.

1.6.2. Incorporación de PET en la mezcla de concreto

Luego de hacer el diseño de la mezcla de concreto con la resistencia requerida (12 MPa) apta para la elaboración de materiales prefabricados, se comienza con la adición de fibras

compuestas por material PET en la mezcla, esto se hace partiendo del volumen total de agregado grueso empleado en la mezcla. Como el método de diseño del concreto es volumétrico, no se tendrá en cuenta la masa del material PET, pero por facilidades en los cálculos será necesario conocer su densidad.

Se propone sustituir material PET por un porcentaje de agregado grueso en la mezcla, por lo que se hace una sustitución de volumen entre los dos materiales. Cabe resaltar que las cantidades de agua, cemento y agregado fino no se modifican.

La sustitución del material granular por PET se hace en el siguiente orden:

- Sustitución del 5% de agregado grueso con fibras de PET.
- Sustitución del 3% de agregado grueso con fibras de PET.

Una vez se haga la sustitución de un porcentaje de agregado grueso con fibra de PET, se deja especímenes cilíndricos y vigas para ensayarlos en la máquina universal y evaluar su resistencia durante el proceso de curado.

1.6.3. Pruebas de resistencia del concreto

1.6.3.1. Ensayo de resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto. Se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm², MPa y con alguna frecuencia en libras por pulgada cuadrada (psi). (CEMEX, 2019). La resistencia del concreto se mide fallando probetas cilíndricas curadas a diferentes tiempos en la maquina universal.

En Colombia, los ensayos de resistencia a la compresión se realizan de acuerdo al procedimiento estipulado en la NTC 673. En este método de ensayo se debe considerar el tiempo o la edad del espécimen curado.

Para comprobar la resistencia establecida a compresión y una buena manejabilidad del prototipo de la mezcla de concreto diseñada se deberá hacer una verificación de la resistencia mediante ensayos en la maquina universal.

1.6.3.1.1. Caracterización del espécimen. Inicialmente se toman datos de longitud y peso del espécimen.

1.6.3.1.2. Loción de espécimen. Se ubica el bloque de apoyo plano (inferior), con su cara endurecida hacia arriba, sobre la mesa o platina de la máquina de ensayo directamente debajo del bloque de apoyo de asiento esférico (superior). Se limpia las caras de apoyo de los bloques de apoyo superior e inferior de la maquina y del espécimen de ensayo y se ubica el apoyo en la máquina. Se deben alinear cuidadosamente los ejes del espécimen con el centro de empuje del bloque de asiento esférico.

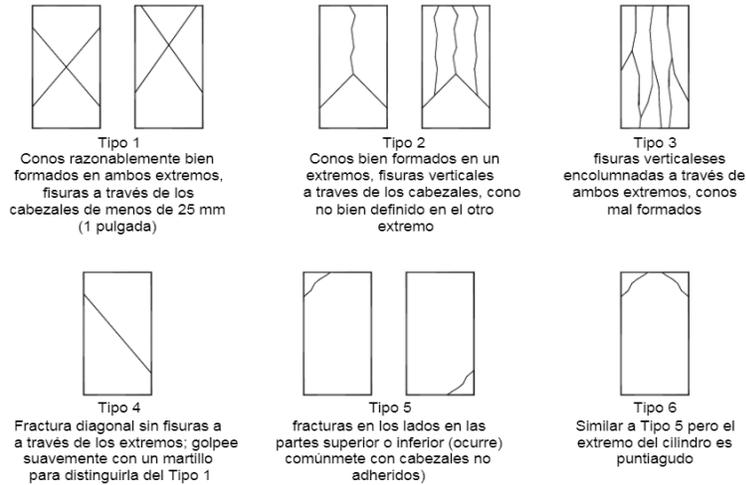
1.6.3.1.3. Verificación de cero y asentamiento del bloque. Previo al ensayo del espécimen, se debe verificar que el indicador de carga esté colocado en cero. En los casos en los que el indicador no está adecuadamente colocado en cero, se ajusta el indicador. El bloque de asiento esférico es llevado a apoyar sobre el espécimen, se gira manual y suavemente su parte móvil de modo tal de obtener un asentamiento uniforme.

1.6.3.1.4. Velocidad de carga. La carga se aplica continuamente y sin impactos. La carga debe ser aplicada a una velocidad de movimiento, medida desde la platina a la cruceta, correspondiente a una velocidad de esfuerzo sobre el espécimen de $0,25 \text{ MPa/s} \pm 0,05 \text{ MPa/s}$ [$35 \text{ psi/s} \pm 7 \text{ psi/s}$]. La velocidad de movimiento designada debe ser mantenida al menos durante la última mitad de la fase de carga anticipada.

1.6.3.1.5. Falla. Se aplica la carga de compresión hasta que el indicador de carga muestre que la carga este decreciendo constantemente y el espécimen muestre un patrón de fractura bien definido o hasta su fractura. Los tipos de falla que se pueden generar se muestran en la (Figura 2).

Figura 2.

Tipos de falla del concreto.

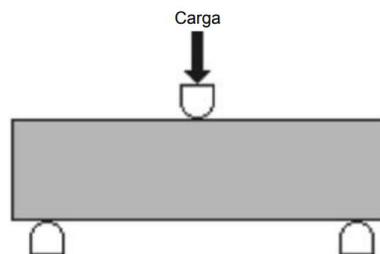


Fuente: NTC 673.

1.6.3.2. Ensayo de resistencia a la flexión. La ASTM C293 describe el método de ensayo estándar para la resistencia a la flexión del concreto (utilizando una viga simple con carga en el punto central, Figura 3). Según Techlabsystems (s.f.), este método de ensayo se utiliza para determinar el módulo de rotura de las probetas preparadas y curadas de acuerdo con las Prácticas C31 / C31M o C192 / C192M. La resistencia determinada variará cuando haya diferencias en el tamaño de la muestra, la preparación, la condición de humedad o el curado.

Figura 3.

Ensayo de flexión para el concreto según la ASTM C293.



Fuente: NRMCA

1.6.3.3. Cronograma y cantidad de probetas para los ensayos. Para determinar la resistencia obtenida del concreto realizado, se establece un cronograma de ensayos (flexión y compresión) para las probetas cilíndricas de concreto estandarizadas, en la Tabla 12 se presentan de color azul los días de ensayo a las muestras:

Tabla 12.

Cronograma de ensayos.

Cronograma de ensayos por día (azul día de ensayo)							
	Días transcurridos antes de la realización del ensayo						Día de realización de ensayo
Semana 1	1	2	3	4	5	6	7
Semana 2	8	9	10	11	12	13	14
Semana 3	15	16	17	18	19	20	21
Semana 4	22	23	24	25	26	27	28

Teniendo el cronograma para los días de ensayo, se calcula la cantidad de probetas a realizar, como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13.

Cantidad de probetas de concreto.

Cantidad de probetas para los ensayos				
PET	Día de ensayo	Cantidad de Cilindros		Cantidad de Vigas
		Pequeños	Grandes	
5%	7	3		2
	14	3		2
	21	3		2
	28		3	2
3%	7	3		2
	14	3		2
	21	3		2
	28		3	2
0%	7	3		2
	14	3		2
	21	3		2

Cantidad de probetas para los ensayos				
PET	Día de ensayo	Cantidad de Cilindros		Cantidad de Vigas
		Pequeños	Grandes	
	28		3	2
	TOTAL	27	9	24

1.6.4. Campo de investigación

La propuesta de investigación se caracteriza principalmente en el campo constructivo debido a que se diseñó una mezcla de concreto innovadora en cuanto a una mezcla de concreto convencional con el reemplazo de un porcentaje de agregado con PET con el objetivo de disminuir considerablemente el periodo de curado y hacer la utilización de esta mezcla de concreto más eficiente para una construcción.

1.6.5. Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo empírica-probabilística, ya que pretende determinar la evolución de la resistencia de un material a base de concreto a través de ensayos de laboratorio a lo largo del tiempo de curado.

1.6.6. Enfoque de investigación

Según el orden de actividades y resultados, esta investigación tiene un enfoque cuantitativo ya que se obtendrán datos a partir de ensayos de laboratorio y el análisis de estos permite contestar y probar la hipótesis establecida más adelante; por otra parte, se confía en la medición numérica y el conteo.

1.6.7. Hipótesis

Es posible obtener una mezcla de concreto capaz de resistir 12MPa de compresión, en un periodo menor a lo habitual (28 días) al sustituir un gran porcentaje de los materiales convencionales por fibras de material reciclado PET; de esta manera se consigue un material

eficiente y seguro en su producción, logrando la resistencia establecida por las normas NTC 3459 y NTC 4029 para la elaboración de materiales prefabricados.

2. Presentación de resultados

2.1. Diseño de la mezcla de concreto

2.1.1. Caracterización de los agregados

Para garantizar la resistencia de cualquier tipo de concreto, es necesario conocer algunas características de los materiales que se tienen disponibles para la mezcla, el método de diseño que se aplica en esta investigación implica determinar estos parámetros; en Colombia existen diferentes normativas que describen el procedimiento adecuado para la caracterización de los agregados. Los ensayos de laboratorio necesarios para la caracterización, junto con las normas correspondientes se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14.

Normativas para los ensayos de caracterización de los agregados.

Ensayo	Norma
Masa unitaria (agregado grueso)	NTC 92
Módulo de finura (agregado fino)	NTC 174
Densidad del agregado grueso	NTC 176
Densidad del agregado fino	NTC 237
Absorción del agregado grueso	NTC 176
Absorción del agregado fino	NTC 237
Humedad del agregado grueso	NTC 1776
Humedad del agregado fino	NTC 1776

2.1.1.1. Masa unitaria. Para establecer la masa unitaria compactada, se obtuvo una cierta cantidad de agregado grueso con los requerimientos o características que describe la NTC 92; teniendo en cuenta que el material no sobre pase los 150mm, así mismo para la obtención de resultados se aplicó la *ecuación 7* como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15.

Resultados del ensayo de masa unitaria compactada.

Masa del molde (Kg)	3,51
Agregado + molde (Kg)	10,3
Masa del agregado (Kg)	6,79
Volumen del molde (m3)	0,005
Masa unitaria (Kg/m3)	1415,14
Fecha de ensayo	17/08/2022

2.1.1.2. Módulo de finura. Para determinar el módulo de finura, fue necesario recolectar una muestra de agregado fino y posteriormente aplicar el procedimiento descrito en la NTC 174; esto implicó realizar un procedimiento de tamizado y posteriormente aplicar la *ecuación 1*, los resultados se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16.

Granulometría del agregado fino.

Granulometría del agregado fino						
Malla	Masa tamiz (g)	Tamiz + Retenido (g)	Retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
# 4	456	459	3	0,32	0,32	99,68
# 8	403	536	133	14,01	14,33	85,67
# 16	360	466	106	11,17	25,50	74,50
# 30	355	421	66	6,95	32,46	67,54
# 50	297	366	69	7,27	39,73	60,27
# 60	301	387	86	9,06	48,79	51,21
# 80	283	433	150	15,81	64,59	35,41
# 100	285	352	67	7,06	71,65	28,35
# 200	279	425	146	15,38	87,04	12,96
Fondo	244	367	123	12,96	100,00	
TOTAL (g)			949	100,00		
Módulo de finura					3,0	

Es importante tener en cuenta que “el módulo de finura no debe ser inferior a 2.2 ni superior a 3.2, ni que varíe en más de 0.2 del valor típico de la fuente abastecimiento del agregado” (Riquett

Ramón, 2018), por lo que se puede afirmar que el agregado fino disponible para la mezcla de concreto es apto.

2.1.1.3. Densidad y absorción agregado fino. De acuerdo con la NTC 274 se determinó la densidad y absorción de la muestra del agregado fino. También se define como densidad nominal o aparente (muestra seca y saturada superficialmente seca) que alude a la forma de tomar el volumen del cuerpo. Para esto primero se estableció la densidad aparente seca a 23°C como se describe en la NTC 385; posteriormente, con la *ecuación 2*, se calculó la densidad aparente para una muestra con base saturada y con la *ecuación 3* la densidad superficialmente seca. Siguiendo el orden de ideas y la NTC 385 se calculó la densidad nominal utilizando la *ecuación 4*.

Para conocer el porcentaje de absorción de una muestra de agregado fino, se sigue el procedimiento de la NTC 237 y haciendo uso de la *ecuación 5*, se calcula el valor de la absorción. Los resultados se muestran en la Tabla 19.

2.1.1.4. Densidad y absorción del agregado grueso. Se determinó la densidad y absorción del agregado grueso con el procedimiento estipulado en la NTC 176, siguiendo una serie de pasos como lo establece la dicha norma se calcularon los valores de la densidad aparente y densidad nominal, además de verificar la absorción del agregado después de 24 horas en condiciones de humedad. Para ello se utilizó la *ecuación 8* que se refiere a la densidad aparente, la *ecuación 9* para la densidad aparente de una muestra (saturada y superficialmente seca), también se encontró el porcentaje específico de absorción del agregado con la *ecuación 11*. Consiguiendo como resultados que se aprecian en la Tabla 19.

2.1.1.5. Porcentajes de humedad. Para establecer el contenido de humedad de los agregados teniendo en cuenta que son materiales permeables, se procedió a utilizar la NTC 1776, y con la *ecuación 6* se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 17 y Tabla 18. Para los agregados finos y gruesos, respectivamente.

Tabla 17.

Porcentaje de humedad del agregado fino.

Fino	
Masa del recipiente (g)	535
Agregado húmedo (g)	1580
Recipiente + agregado seco (g)	2046
Agregado seco (g)	1511
% Humedad	4,57
Fecha de ensayo	17/08/2022

Tabla 18.

Porcentaje de humedad del agregado grueso.

Grueso	
Masa del recipiente (g)	727
Agregado húmedo (g)	358
Recipiente + agregado seco (g)	1069
Agregado seco (g)	342
% Humedad	4,68
Fecha de ensayo	17/08/2022

En resumen, los valores obtenidos de cada ensayo correspondientes a la caracterización de los agregados se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19.

Resultados de la caracterización de los agregados.

Ensayo	Norma	Resultados	Unidades
Masa unitaria (agregado grueso)	NTC 92	1427,42	Kg
Módulo de finura (agregado fino)	NTC 174	3,0	%
Densidad del agregado grueso	NTC 176	2,44	g/ cm3
Densidad del agregado fino	NTC 237	2,49	g/ cm3
Absorción del agregado grueso	NTC 176	2,36	%
Absorción del agregado fino	NTC 237	1,3	%
Humedad del agregado grueso	NTC 1776	4,68	%
Humedad del agregado fino	NTC 1776	4,57	%

2.1.2. Caracterización del cemento

En cuanto al cemento utilizado, se trabajó con la marca CEMEX (Figura 4). Debido a sus características ya que es ideal para la elaboración de concretos con una densidad de 2400 Kg/m³.

Figura 4.

Marca de cemento utilizado.



Fuente: CEMEX Colombia

2.1.3. Caracterización de las fibras PET

Las fibras que se emplearon fueron adquiridas por medio de MercadoLibre, desde una empresa ubicada en Cúcuta perfectas para diseñar una mezcla de concreto con una contextura flexible de fácil manejabilidad, estas se muestran en la Figura 5.

Figura 5.

Fibra de PET



2.1.4. Diseño de la mezcla de concreto basado en la A.C.I.

El siguiente método consiste en determinar la cantidad de los materiales básicos (cemento, aire, agua, grava y arena), en masa y en volumen absolutos, para un metro cúbico (1 m³) de concreto, considerando las propiedades de los agregados disponibles para su elaboración. Como se muestra a continuación:

- **Paso 1:** Elección de la manejabilidad de la mezcla (asentamiento).

Para determinar el asentamiento se considera la consistencia requerida para la elaboración de prefabricados, para esto se asume una consistencia semi seca del concreto y posteriormente un asentamiento de 2,5 cm.

- **Paso 2:** Elección del Tamaño máximo Nominal (TMN) del agregado grueso.

Considerando que el propósito de la mezcla es la elaboración de materiales prefabricados, se asume un TMN de 19mm, dado que las paredes de un bloque de concreto (el prefabricado más común) no superan los 3 cm de espesor.

- **Paso 3:** Determinación del contenido de aire.

El contenido o porcentaje de aire se establece de acuerdo con ciertas características como el TMN y según los varios grados de exposición, el contenido de aire se muestra la Tabla 20.

Tabla 20.

Contenido de aire.

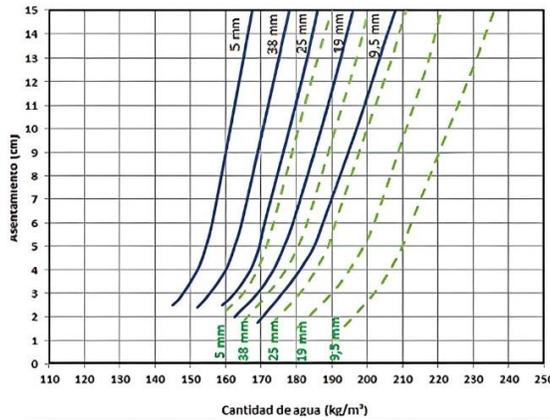
Varios grados de exposición	
TMN (mm)	%
9,5	2,7
12,5	2,5
19	2
25	1,7
38	1,5
4,75	2,8

- **Paso 4:** Determinación de la cantidad de agua de mezcla.

El contenido de agua depende directamente del asentamiento y del tamaño máximo nominal, y se lo determina a partir de la Tabla 5; de manera similar, el método ACI presenta la siguiente grafica (Figura 6). Para determinar el contenido de agua para un concreto sin aire incluido y con agregados grueso de forma angular:

Figura 6.

Contenido de agua kg/m^3 (método ACI).



Fuente: Método ACI 211.

Se asume un valor de $185 kg/m^3$.

- **Paso 5:** Elección de la relación (a/c) o agua/material cementante (a/mc).

Se determina a partir de la resistencia de diseño de la mezcla de concreto que se muestra a continuación, la resistencia de diseño se determina a partir de la Tabla 21.

Tabla 21.

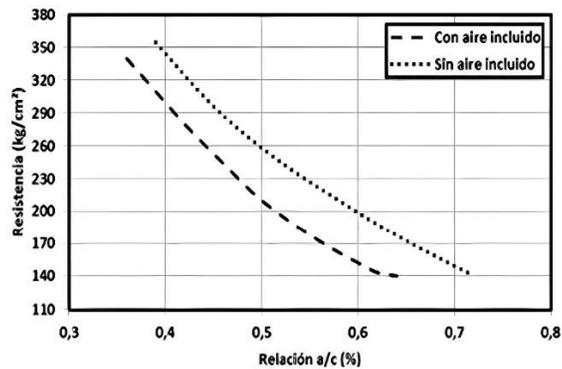
Resistencia de la mezcla de concreto.

F'c	MPa	12
	Kg/cm ²	122
F'cr	MPa	19
	Kg/cm ²	194

A partir de la relación agua/cemento (Tabla 10) y de la resistencia de diseño de la mezcla de concreto se determina la relación a/mc; así mismo el método ACI presenta el siguiente gráfico (Figura 7) para determinar dicho valor:

Figura 7.

Relación a/mc.



Fuente: Método ACI 211.

Se asume una relación a/mc de 0.6.

- **Paso 6:** Cálculo del contenido de cemento.

De la relación a/mc, se determinó que la cantidad de cemento corresponde a 308 kg/m³.

- **Paso 7:** Estimación contenida de agregado grueso (grava).

Para la determinación de agregado grueso se utiliza la NTC 92 para una 1m³ de concreto y se obtiene la cantidad exacta de la *ecuación 7*.

$$MF = 3$$

Tabla 22.

Contenido de agregado grueso.

TMN (mm)	b/bo
9,5	0,4
12,5	0,49
19	0,57
25	0,64
638	0,7
50	0,73
75	0,78
150	0,84
4,75	0,32

$$bo = 0.57$$

$$\text{Vol A. grueso (m}^3/\text{m}^3) = 0.34$$

- **Paso 8:** Contenido de agregado fino (arena).

Para la determinación del agregado fino se utilizó la *ecuación 13*.

$$\text{Vol A. fino (m}^3/\text{m}^3) = 0,35$$

- **Paso 9:** ajuste por humedad de los agregados.

Para el ajuste de agua en la mezcla teniendo en cuenta la resistencia y la relación agua-cemento de hizo uso de la *ecuación 14*.

$$\text{Agua ajustado kg} = 138,50 \text{ Kg/m}^3$$

2.1.4.1. Cantidades de diseño para 1m³ de concreto. De acuerdo con el procedimiento de diseño estipulado por el Método ACI, se determinaron las siguientes cantidades para la elaboración de 1 m³ de concreto, como se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23.

Total, materiales para la mezcla.

	Volumen (m ³ /m ³)	Masa (kg/ m ³)
Aire	0,00	0
Agua	0,19	185
cemento	0,13	308
A. grueso	0,34	835
A. fino	0,35	903
Σ	1,00	

2.1.4.2. Cantidad de concreto para la investigación. Para determinar la cantidad de concreto a utilizar fue necesario determinar la cantidad de probetas que se elaboraran para los ensayos correspondientes de compresión y flexión, teniendo en cuenta las dimensiones estándar estipuladas en la norma ASTM C 617, la cual indica la utilización de cilindros para pruebas de resistencia a la compresión de 4 x 8 pulgadas (100 mm x 200 mm) y 6 x 12 pulgadas (150 mm x 300 mm); así mismo, se elaboran vigas de sección transversal de 120mm x 120mm con un largo de 500 mm.

En la Tabla 13 se muestra la distribución de probetas de concreto adicionado con PET y la cantidad de probetas de concreto convencional que sirva como referencia; con esta información se calcula el volumen total de concreto para las dimensiones de las muestras como se muestra en la Tabla 24 es necesario para la realización de probetas cilíndricas:

Tabla 24.

Volumen de concreto necesario para la realización de probetas.

Probetas cilíndricas			Vigas	
Altura (m)	0,2	0,3	Área transversal (m ²)	0,0256
Diámetro (m)	0,1	0,15	Largo	0,55
Volumen (m ³)	0,0016	0,0053	Volumen (m ³)	0,0141

Con los cálculos respectivos se presume que se necesitaran 0.45m^3 de concreto para la elaboración de la totalidad de probetas de concreto para los ensayos.

2.1.4.3. Cantidad de PET. Con el volumen total de concreto para el muestreo, se determina la cantidad total de agregado grueso y posteriormente la cantidad promedio de fibra de PET que se utilizará; esto mediante una estimación, a partir de que para un concreto con una resistencia alrededor de 12 MPa, la cantidad de agregado grueso es alrededor de $1/3$ del volumen total entre todos los materiales; como se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25.

Volumen total de PET.

Volumen total de concreto (m^3)	0.43
Volumen promedio de agregado grueso ($1/3$) (m^3)	0.14
Volumen aproximado de PET (m^3)	0.008

NOTA: El volumen mostrado de PET es un aproximado que se determina a partir de suposiciones, el valor exacto surge a partir de las cantidades exactas de obra que se muestran más adelante.

2.2. Incorporación de la fibra de PET en la mezcla de concreto

Luego de realizar el diseño de la mezcla de concreto y teniendo las cantidades exactas de material por cada metro cúbico de concreto, se calculó el volumen total de material necesario, considerando el volumen de las probetas y un 7% de pérdidas de este, para esto se tomaron los volúmenes de las probetas indicados en la Tabla 33. La Tabla 26. presenta el número total de probetas requeridas para realizar los ensayos correspondientes de resistencia como también el volumen necesario de material.

Tabla 26.

Cantidad de probetas de concreto.

Cantidad de probetas para los ensayos			
PET	Cilindros pequeños	Cilindros grandes	Vigas
5%	9	3	8
3%	9	3	8
0%	9	3	8
Total	27	9	24
Volumen Total(m3)	0,042	0,048	0,338

Con este cálculo, se recolectaron los materiales correspondientes para elaborar 0,45 m³ de concreto.

Para incorporar las fibras de PET en los porcentajes propuestos, fue necesario hacer una distribución independiente para cada tipo de concreto (con 0%, 3% y 5% de fibra de PET); de esta forma se hizo un reemplazo volumétrico del agregado grueso con la fibra de PET, cabe resaltar que los porcentajes o cantidades de los otros elementos de la mezcla no presentan variaciones. Las cantidades de material necesarias para elaborar las probetas de cada tipo de concreto se indican en la Tabla 27, Tabla 28 y Tabla 29

Tabla 27.

Cantidad de material para elaborar las probetas con 0% de fibra de PET.

Concreto con 0% de fibra de PET			
Valor	m3	kg/m3	kg/m3 + perdidas
Aire	0,00	0,00	0,00
Agua	0,01	14,82	15,12
cemento	0,01	33,00	33,65
A. grueso	0,04	89,35	91,13
A. fino	0,04	96,59	98,52

Tabla 28.

Cantidad de material para elaborar las probetas con 3% de fibra de PET.

Concreto con 3% de fibra de PET			
Valor	m3	kg	kg + perdidas
Aire	0,00	0,00	0,00
Agua	0,01	14,82	15,12
cemento	0,01	33,00	33,65
A. grueso	0,03	86,67	88,40
A. fino	0,04	96,59	98,52
PET	0,00	1,02	1,04

Tabla 29.

Cantidad de material para elaborar las probetas con 5% de fibra de PET.

Concreto con 5% de fibra de PET			
Valor	m3	kg	kg + perdidas
Aire	0,00	0,00	0,00
Agua	0,01	14,82	15,12
cemento	0,01	33,00	33,65
A. grueso	0,03	84,88	86,58
A. fino	0,04	96,59	98,52
PET	0,00	1,69	1,73

2.3. Elaboración de probetas

Después de calcular las distribuciones, masas y volúmenes de los elementos del concreto, se procedió a realizar el proceso de mezclado (Figura 8). Este se dividió en tres partes, para cada tipo de concreto. Se utilizó un trompo mecánico y posteriormente se procedió a la elaboración de las probetas.

Figura 8.

Proceso de mezclado e incorporación de las fibras de PET a la mezcla.



Cada tipo de mezcla obtenida se sometió a los ensayos correspondientes de asentamiento (Figura 9). Siguiendo el procedimiento de la NTC 396, los datos registrados se muestran en la Tabla 30.

Figura 9.

Ensayo de asentamiento según la NTC 396.



Tabla 30.

Resultados de asentamiento.

Asentamiento del concreto (cm)	
0% PET	2,5
3% PET	3,3
5% PET	3,8

De acuerdo a la Tabla 30, se puede observar que a medida que aumenta la cantidad de fibras PET en la mezcla, se incrementa el asentamiento del concreto debido a la influencia de las fibras en la fluidez y la trabajabilidad del concreto fresco. Esto ocurre porque al añadir más fibras de PET a la mezcla, estas actúan como obstáculos dentro del concreto, lo que dificulta su capacidad para fluir y, en consecuencia, genera un mayor asentamiento, lo cual se debe a que se requiere mayor cantidad de energía para que el concreto fluya y se acomode en su lugar.

Figura 10.

Proceso de elaboración de las probetas.



Luego de 24 horas de la elaboración de las probetas, se llevó a cabo el desencofrado y curado respectivamente. Cabe resaltar que todas las probetas se sometieron a las mismas condiciones durante estos procesos Figura 11.

Figura 11.

Procesos de desencofrado y curado de las probetas.



2.4. Ensayos de resistencia

Se realizaron los ensayos de resistencia a la compresión y flexión dependiendo el tipo de probeta, según lo indican las normativas correspondientes NTC 673 y ASTM C293 respectivamente. Para el desarrollo de estas pruebas, se utilizó la maquina universal Figura 12.

Figura 12.

Montaje de las probetas para los ensayos de resistencia a flexión y compresión.



2.4.1. Resultados obtenidos de resistencia

Los ensayos correspondientes de resistencia a la compresión y flexión se aplicaron en las fechas establecidas según el cronograma (Tabla 12) y siguiendo los procedimientos descritos por las respectivas normas; los resultados se muestran en la Tabla 31, Tabla 32, Tabla 33, Tabla 34, Tabla 35, Tabla 36,

Tabla 37, Tabla 38 y Tabla 39.

2.4.1.1. Concreto con edad de 7 días. La primera prueba de resistencia se evaluó a la primera semana de curado del concreto; los datos obtenidos se muestran en la Tabla 31 y Tabla 32

Tabla 31.

Resistencia a la compresión de los concretos a los 7 días.

Primer ensayo a Compresión (Edad = 7 días)				
Concreto	Datos	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
5% PET	Diámetro (cm)	10	10	10
	Alto (cm)	20,2	20	20
	Masa (Kg)	3,46	3,38	3,48
	Fuerza (kN)	138,04	143,39	138,51
	Resistencia (MPa)	17,58	18,26	17,64
3% PET	Diámetro (cm)	15	15	15
	Alto (cm)	30	30	30
	Masa (Kg)	12.04	12.06	12.10
	Fuerza (kN)	128,03	146,58	215,18
	Resistencia (MPa)	6.78	7.77	11.40
0% PET	Diámetro (cm)	15	15	15
	Alto (cm)	30	30	30
	Masa (Kg)	11,48	11,68	11,56
	Fuerza (kN)	69,91	74,06	74,98
	Resistencia (MPa)	3,96	4,19	4,24

Tabla 32.

Resistencia a la flexión de los concretos a los 7 días.

Primer ensayo a flexión (Edad = 7 días)			
Concreto	Datos	Viga 1	Viga 2
5% PET	Ancho (cm)	15,5	15,5
	Alto (cm)	15,5	15,5
	Largo (cm)	54,5	53,5
	Masa (Kg)	26,54	25,94
	Fuerza (kN)	21,17	21,87
	Resistencia (MPa)	4,24	4,23

Primer ensayo a flexión (Edad = 7 días)			
Concreto	Datos	Viga 1	Viga 2
3% PET	Ancho (cm)	15.5	15.5
	Alto (cm)	15.5	15.5
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	27.28	27
	Fuerza (kN)	22,75	22,5
	Resistencia (MPa)	4,99	4.98
0% PET	Ancho (cm)	15,5	15
	Alto (cm)	16	15,5
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	27,74	26,42
	Fuerza (kN)	19,42	17,84
	Resistencia (MPa)	4,04	4.08

2.4.1.2. Concreto con edad de 14 días. Luego de 14 días de curado en iguales condiciones para cada probeta, se realiza el segundo ensayo de resistencia, los resultados se muestran en la Tabla 33 y Tabla 34.

Tabla 33.

Resistencia a la compresión de los concretos a los 14 días.

Segundo ensayo a Compresión (Edad = 14 días)				
Concreto	Datos	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
5% PET	Diámetro (cm)	15,6	15,9	15,4
	Alto (cm)	31	31	30,1
	Masa (Kg)	11,6	11,7	11,6
	Fuerza (kN)	355,8	359,37	338,89
	Resistencia (MPa)	18,62	18,1	18,19
3% PET	Diámetro (cm)	10	10	15
	Alto (cm)	20,5	20,5	30
	Masa (Kg)	3,6	3,6	12,12
	Fuerza (kN)	97,9	100,88	223,34
0% PET	Resistencia (MPa)	12,47	12,84	12,64
	Diámetro (cm)	10,1	10,4	10,1
	Alto (cm)	20	20,4	20,5
	Masa (Kg)	3,42	3,43	3,4
	Fuerza (kN)	53,24	54,97	49,99
	Resistencia (MPa)	6,65	6,47	6,24

Tabla 34.

Resistencia a la flexión de los concretos a los 14 días.

Segundo ensayo a flexión (Edad = 14 días)			
Concreto	Datos	Viga 1	Viga 2
5% PET	Ancho (cm)	15,5	15,5
	Alto (cm)	15,5	15,5
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	26,7	26,3
	Fuerza (kN)	20,12	20,46
	Resistencia (MPa)	4,19	4,26
3% PET	Ancho (cm)	15	15
	Alto (cm)	15,5	15,5
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	27,44	27,26
	Fuerza (kN)	23,9	23,7
	Resistencia (MPa)	4,99	4,93
0% PET	Ancho (cm)	15,7	15,7
	Alto (cm)	15,7	15,7
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	27,48	26,84
	Fuerza (kN)	22,5	23,09
	Resistencia (MPa)	3,92	4,03

2.4.1.3. Concreto con edad de 21 días. Luego de 21 días de curado en iguales condiciones para cada probeta, se realiza el tercer ensayo de resistencia, los resultados se muestran en la Tabla 35 y Tabla 36.

Tabla 35.

Resistencia a la compresión de los concretos a los 21 días.

Tercer ensayo a Compresión (Edad = 21 días)				
Concreto	Datos	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
5% PET	Diámetro (cm)	10,5	10,3	10,2
	Alto (cm)	20,5	20,7	20,5
	Masa (Kg)	3,5	3,5	3,42
	Fuerza (kN)	176,34	168,87	164,69
	Resistencia (MPa)	20,36	20,27	20,15
3% PET	Diámetro (cm)	10	10	10

Tercer ensayo a Compresión (Edad = 21 días)				
Concreto	Datos	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
	Alto (cm)	20	20	20
	Masa (Kg)	3,52	3,56	3,58
	Fuerza (kN)	113,17	104,97	94,25
	Resistencia (MPa)	14,41	13,37	12
0% PET	Diámetro (cm)	9,6	10	10
	Alto (cm)	20,5	20,5	20,5
	Masa (Kg)	3,24	3,3	3,38
	Fuerza (kN)	77,9	79,64	76,7
	Resistencia (MPa)	10,76	10,14	9,77

Tabla 36.

Resistencia a la flexión de los concretos a los 21 días.

Tercer ensayo a flexión (Edad = 21 días)			
Concreto	Datos	Viga 1	Viga 2
5% PET	Ancho (cm)	15,3	15,3
	Alto (cm)	16	16
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	26,22	26,22
	Fuerza (kN)	25,09	25,09
	Resistencia (MPa)	5,28	5,28
3% PET	Ancho (cm)	15,5	15,5
	Alto (cm)	15,5	15,5
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	28,08	28,08
	Fuerza (kN)	28,73	28,73
	Resistencia (MPa)	5,67	5,67
0% PET	Ancho (cm)	15.5	15.5
	Alto (cm)	15	15
	Largo (cm)	54.5	54.5
	Masa (Kg)	27.02	27.02
	Fuerza (kN)	19.02	19.02
	Resistencia (MPa)	4.13	4.13

2.4.1.4. Concreto con edad de 28 días. Luego de 28 días de curado en iguales condiciones para cada probeta, se realiza el cuarto ensayo de resistencia, los resultados se muestran en la

2.4.1.5. Tabla 37 y Tabla 38.

Tabla 37.

Resistencia a la compresión de los concretos a los 28 días.

Cuarto ensayo a Compresión (Edad = 28 días)				
Concreto	Datos	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
5% PET	Diámetro (cm)	10	10	10
	Alto (cm)	20,5	20,5	20,5
	Masa (Kg)	3,48	3,48	3,48
	Fuerza (kN)	169,05	169,05	169,05
	Resistencia (MPa)	21,52	21,52	21,52
3% PET	Diámetro (cm)	10	10	10
	Alto (cm)	20,5	20,5	20,5
	Masa (Kg)	3,52	3,52	3,52
	Fuerza (kN)	128,2	128,2	128,2
	Resistencia (MPa)	16,32	16,32	16,32
0% PET	Diámetro (cm)	10	10	10
	Alto (cm)	20,5	20,5	20,5
	Masa (Kg)	3,42	3,42	3,42
	Fuerza (kN)	103,04	103,04	103,04
	Resistencia (MPa)	13,12	13,12	13,12

Tabla 38.

Resistencia a la flexión de los concretos a los 28 días.

Cuarto ensayo a flexión (Edad = 28 días)			
Concreto	Datos	Viga 1	Viga 2
5% PET	Ancho (cm)	15,5	15,5
	Alto (cm)	15,5	15,5
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	26,84	26,84
	Fuerza (kN)	27,89	27,89
	Resistencia (MPa)	5,73	5,73
3% PET	Ancho (cm)	15,5	15,5
	Alto (cm)	15,5	15,5
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	27,38	27,38
	Fuerza (kN)	32,13	32,13
	Resistencia (MPa)	6,34	6,34
0% PET	Ancho (cm)	15,5	15,5
	Alto (cm)	15,5	15,5
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	27,26	27,26

Cuarto ensayo a flexión (Edad = 28 días)			
Concreto	Datos	Viga 1	Viga 2
	Fuerza (kN)	22,35	22,35
	Resistencia (MPa)	15,5	15,5

2.5. Resultados y análisis

A continuación, se presentan dos graficas (Figura 13. y Figura 14.) con las evoluciones de resistencia a compresión y flexión para cada tipo de concreto a lo largo del proceso de curado; los gráficos resultan de promediar los resultados obtenidos en los correspondientes ensayos de resistencia. Los promedios de resistencia a la compresión para cada edad y tipo de concreto se muestran en la Tabla 39.

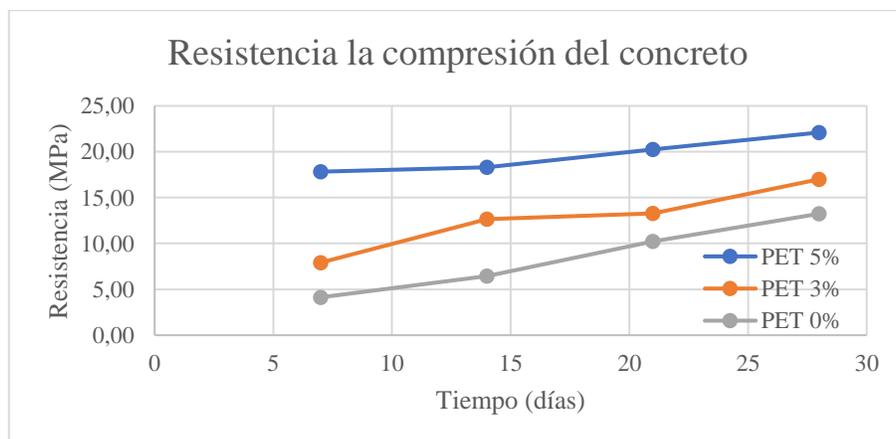
Tabla 39.

Resultados promedio de resistencia a la compresión de los concretos.

Resistencia promedio a la compresión del concreto (MPa)				
Edad (días)	7	14	21	28
Concreto con 5% PET	17,83	18,30	20,26	22,10
Concreto con 3% PET	8,65	12,65	13,26	17,00
Concreto normal (0% PET)	4,13	6,45	10,22	13,24

Figura 13.

Evolución de la resistencia a la compresión de los concretos.



El grafico anterior permite establecer una relación con respecto a la variación en las proporciones o cantidades de adición de PET a la mezcla de concreto, generando así una mayor resistencia a la compresión del producto final, y es importante destacar que la eficiencia de este procedimiento está ligado al límite de adición de fibra, ya que los métodos convencionales de mezclado (mecánico por medio de mezcladoras) generan que la fibra, al ser un material semi rígido se aglomere y entrecruce, dando lugar a la formación de esferas y generando espacios vacíos, pero, se debe tener en cuenta que entre más porosidad menos resistencia. En el caso de la adición de las fibras PET, la resistencia aumenta debido a que éstas actúan como refuerzo, ayudando a prevenir la fisuración y proporcionando una resistencia adicional al concreto cuando se somete a cargas de compresión, sin embargo, se podría presentar el impacto negativo de la porosidad con el tiempo a medida que el concreto envejece y se somete a ciclos de carga.

También, se observa que para los dos casos donde el concreto fue reforzado con la fibra, la mezcla final tiene un incremento en la resistencia de manera uniforme respecto a la relación de porcentajes de adición de PET. De los resultados de resistencia semana a semana para los dos tipos de concreto registrados en la Tabla 39Tabla 39.

Tabla 39 se puede evidenciar que la diferencia de resistencias a la compresión para la primer semana de edad es muy considerable y que en el caso del concreto con 5% de fibra de PET la resistencia de diseño de la mezcla base fue alcanzada, con un promedio de 17,83 MPa; en el otro caso, la resistencia de diseño base fue alcanzada en la segunda semana de edad, con un promedio de 12,65 MPa, por lo que se puede evidenciar que la investigación y la añadidura de fibra de PET es viable y aplicable, logrando una resistencia en un menor tiempo, utilizando un diseño de mezcla estándar y reduciendo el tiempo de producción. Ahora bien, el plus que destaca esta investigación se basa en que el elemento final con adición de PET, se garantizan mayores resistencias a la compresión, en relación a lo que puede ofrecer un elemento con mezcla convencional.

Como un análisis adicional y de gran importancia dentro del nicho de la ingeniería civil, se hace un estudio de datos con pruebas de probetas con adición de PET a la flexión en diferentes proporciones, generando resultados en relación a los obtenidos a la compresión muy similares en

su incremento de resistencia, en la Tabla 40. Se puede observar los resultados para cada edad y tipo de concreto:

Tabla 40.

Resultados promedio de resistencia a la flexión de los concretos.

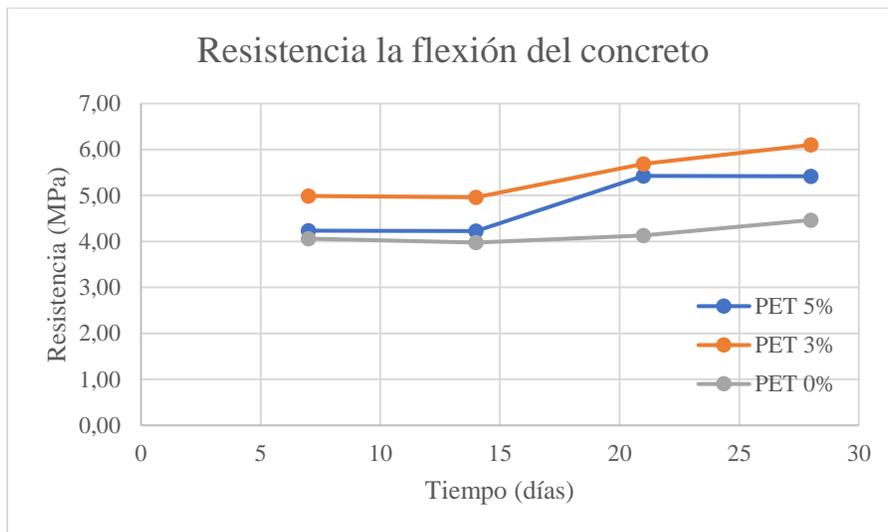
Resistencia promedio a la flexión del concreto (MPa)				
Edad (días)	7	14	21	28
Concreto con 5% PET	4,24	4,23	5,43	5,42
Concreto con 3% PET	4,99	4,96	5,69	6,10
Concreto normal (0% PET)	4,06	3,98	4,13	4,47

Con los resultados promedios de resistencia a la flexión de los concretos, se realiza una gráfica comparativa de resultados (Figura 14

Figura 14).

Figura 14.

Evolución de la resistencia a la flexión de los concretos.



Del gráfico anterior se puede inferir que la adición de PET a mezclas en concreto genera una mayor resistencia frente a los diferentes esfuerzos a los que este una vez aplicado puede lograr, para este caso el concreto con 3% de fibra de PET incorporado es el más óptimo para elementos

que van a estar sometidos a la flexión en referencia a los esfuerzos que puede soportar una mezcla convencional. La manejabilidad y asentamiento de los concretos (Tabla 38), permite establecer que la incorporación de las fibras de PET aumenta la plasticidad del elemento final, es entonces donde esta variable tiene gran valor en el desarrollo de la fabricación de prefabricados, ya que la base de estos materiales requiere mezclas de concretos con una consistencia semi seca, además genera una reducción de incorporación de agua generando un cambio en la relación agua-cemento (a/c), con el único fin de obtener un aumento de resistencia en su producto final.

En pruebas experimentales realizadas en laboratorio (Figura 15). Permite clasificar el tipo de falla que presenta el espécimen de concreto convencional como una “tipo 3”, según la NTC 673, y en relación al tipo de falla de los concretos reforzados con fibra de PET, estos presentan fallas apenas perceptibles, donde el concreto no sufre desportillamiento ni explosión, conservando en apariencia su composición inicial.

En general, se logró la resistencia de diseño en la mezcla base, por lo que las comparaciones entre los distintos tipos de concreto tienen lugar. Por ende, también se pueden hacer comparativas entre las distintas características y propiedades entre los concretos.

Figura 15.

Fallas del concreto base, con 3% y 5% de fibra de PET respectivamente.



En cuanto a su terminación y apariencia final, los tres concretos presentan color y textura similar, sin cambios químicos internos, garantizando una apariencia óptima en terminación para todo tipo de elemento prefabricado.

Un punto determinante y talvez lógico es la masa final de los elementos de concreto, en la caracterización de los especímenes para los respectivos ensayos de resistencia se puede evidenciar la diferencia de masas entre los tres distintos tipos de concreto, de manera rápida se muestra en la Tabla 41. La masa final de la totalidad de concreto elaborado para los tres porcentajes de fibra de PET, cabe resaltar que la adición o sustitución de fibra de PET fue volumétrica y por ende se obtiene el mismo volumen de material:

Tabla 41.

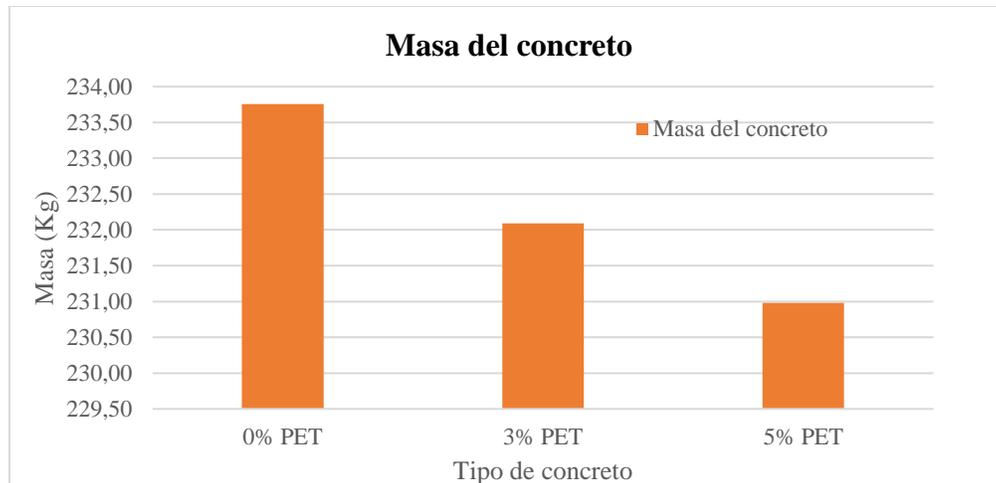
Masa de los tipos de concreto.

Concreto	Masa (Kg)	Volumen (m³)
0% PET	233,76	0,10
3% PET	232,09	0,10
5% PET	230,98	0,10

El siguiente grafico (Figura 16). Se presenta la distribución de masa para el mismo volumen de concreto en los tres distintos tipos:

Figura 16.

Masa de los diferentes tipos de concreto.



Se puede concluir que la adición de fibra de PET en cualquier tipo de concreto reduce el peso de este lo que conlleva a que el uso de elementos prefabricados elaborados con este tipo de mezclas disminuye el peso de los elementos no estructurales en cualquier tipo de obra civil donde sean empleados.

3. Conclusiones

Mediante la sustitución volumétrica de un porcentaje de agregado grueso por fibra de PET en una mezcla de concreto hidráulico convencional, se logra alcanzar la resistencia de diseño a la compresión en un periodo de tiempo menor a lo habitual (28 días), estas resistencias se alcanzan a los 7 días y 14 días de curado para los concretos con 5% y 3% con fibra de PET, respectivamente.

Por medio del método de diseño ACI 211, se logró obtener resultados óptimos en los especímenes de concreto hidráulico convencional (utilizado como referencia en esta investigación), se obtuvo un asentamiento de 2.5 cm y una resistencia final a la compresión de 12 MPa, que inicialmente fueron propuestos para el diseño de mezcla.

La sustitución volumétrica de fibra de PET por agregado grueso en una mezcla de concreto hidráulico convencional aumenta la trabajabilidad y el asentamiento de esta; comparando los resultados de asentamiento en la Tabla 30, se verifica que este puede variar dependiendo de la cantidad de fibra añadida, lo que significa que entre más fibra contenga la mezcla de concreto, mayor será el asentamiento. Esto se debe a que el PET es un material menos absorbente que la grava y por ende no hay pérdida del agua de mezclado.

A través de la elaboración de los especímenes de concreto, se pudo comprobar que la implementación de fibra de PET para concretos mezclados en trompo no debe superar el 5% de

sustitución del volumen de total de la grava, también es importante la adición controlada de la fibra, de esta forma se evita su aglomeración y distribución irregular del material (esferas de fibra tipo PET) producto del mezclado; esto conlleva a la formación de vacíos en la mezcla.

Comparando las resistencias finales entre un concreto convencional y un concreto con fibra de PET, se puede afirmar que la implementación de fibra de PET en una mezcla de concreto hidráulico incrementa de manera exponencial sus resistencias finales de compresión y flexión después del periodo de curado; para el concreto hidráulico de esta investigación (12 MPa de resistencia a la compresión) se alcanzaron resistencias finales a la compresión de 22.10 MPa, 17.00 MPa y 13.24 MPa para los concretos con 5%, 3% y 0% (convencional), respectivamente; y resistencias finales a la flexión de 5.42 MPa, 6.10 MPa y 4.47 MPa para los concretos con 5%, 3% y 0% (convencional), respectivamente.

Después de que las probetas fueron sometidas a ensayos de resistencia, se pudo comprobar que la fibra de PET se adhiere al concreto y genera un mayor amarre entre los componentes de este, permitiendo una falla sin desportillamientos, independientemente del tipo de ensayo (flexión o compresión) tal y como se puede evidenciar en la Figura 15.

La fibra de PET, genera una mejoría en las propiedades físico- mecánicas en una mezcla de concreto, mejorando variables como la resistencia a flexión y compresión, la adherencia entre partículas, la trabajabilidad y su peso final, a diferencia de una mezcla convencional. Además, el PET reciclado suele ser una opción económica en comparación a otras fibras y se trata de un material reciclado, que contribuye a la sostenibilidad y a la gestión de residuos. Sin embargo, el precio de fibras PET puede variar según su disponibilidad y la región.

Los productos finales que tengan incorporación de fibras PET generan una mayor eficiencia en su proceso de producción, ocasionando un mayor flujo de productos en un periodo de tiempo menor, al alcanzar las resistencias establecidas en las NTC 4026 (1997) y NTC 4076 (1997) para elementos prefabricados estructurales y no estructurales, respectivamente.

La implementación de fibra de PET en una mezcla de concreto hidráulico contribuye con el cuidado y protección del medio ambiente, disminuyendo el impacto ambiental al reutilizar toda clase de elementos reciclables hechos a base de polímeros.

4. Recomendaciones

Para el desarrollo de estos procesos de mezclado se recomienda incursionar con sistemas de mezclado horizontales, de paletas, con el fin de generar homogeneidad en el producto final; se debe tener en cuenta que la capacidad de mezcla procesada depende de la potencia de la maquinaria.

Para alcanzar resultados de resistencia óptimos, se recomienda la implementación de un proceso de curado adecuado, como a vapor o inmersión total en los elementos prefabricados con este material.

Con los resultados obtenidos y analizados, para elementos de concreto sometidos a compresión, se recomienda la implementación del 5% de fibras tipo PET y un 3% de fibras tipo PET para elementos sometidos a flexión.

Bibliografía

- ACI. (2000). ACI Manual of Concrete Practice 2000. In *Part 1: Materials and General Properties of Concrete*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ARGOS. (n.d.). *Ensayo de asentamiento del concreto*. Retrieved from <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/ensayo-de-asentamiento-del-concreto#:~:text=El%20asentamiento%20es%20una%20medida,o%20fluido%20est%C3%A1%20el%20concreto.>
- CAMACOL. (2016). *Las ventajas de los prefabricados de concreto*. Retrieved from <https://camacolvalle.org.co/las-ventajas-de-los-prefabricados-de-concreto/>
- CANACEM. (SF). *¿Qué es el cemento?* Retrieved from <https://canacem.org.mx/que-es-el-cemento/>
- Carreño Bustos, A. (2015). Estudio de la prefabricación en concreto reforzado y su influencia en la construcción de estructuras en Colombia. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- CEMEX. (2019, Abril 5). *¿Por qué se determina la resistencia a la compresión en el concreto?* Retrieved from Artículos de Construcción: [https://www.cemex.com.pe/-/por-que-se-determina-la-resistencia-a-la-compresion-en-el-concreto-#:~:text=La%20resistencia%20a%20la%20compresi%C3%B3n%20simple%20es%20la%20caracter%C3%ADstica%20mec%C3%A1nica,por%20pulgada%20cuadrada%20\(psi\).](https://www.cemex.com.pe/-/por-que-se-determina-la-resistencia-a-la-compresion-en-el-concreto-#:~:text=La%20resistencia%20a%20la%20compresi%C3%B3n%20simple%20es%20la%20caracter%C3%ADstica%20mec%C3%A1nica,por%20pulgada%20cuadrada%20(psi).)
- CEMEX. (2019, Abril 5). *Artículos de Construcción*. Retrieved from *¿Por qué se determina la resistencia a la compresión en el concreto?:* [https://www.cemex.com.pe/-/por-que-se-determina-la-resistencia-a-la-compresion-en-el-concreto-#:~:text=La%20resistencia%20a%20la%20compresi%C3%B3n%20simple%20es%20la%20caracter%C3%ADstica%20mec%C3%A1nica,por%20pulgada%20cuadrada%20\(psi\).](https://www.cemex.com.pe/-/por-que-se-determina-la-resistencia-a-la-compresion-en-el-concreto-#:~:text=La%20resistencia%20a%20la%20compresi%C3%B3n%20simple%20es%20la%20caracter%C3%ADstica%20mec%C3%A1nica,por%20pulgada%20cuadrada%20(psi).)

CEMEX. (2019, Junio 19). *Hablando de Cementos Portland*. Retrieved from Artículos de Construcción: <https://www.cemex.com.pe/-/hablando-de-cementos-portland>

CEMEX. (n.d.). *Agregados para concreto*. Retrieved from <https://www.cemexmexico.com/productos/agregados#:~:text=El%20agregado%20es%20un%20material,a%20su%20uso%20y%20aplicaci%C3%B3n>.

CEMEX. (n.d.). *Cemento*. Retrieved from Productos: <https://www.cemex.com/es/productos-servicios/productos/cemento>

CEMEX. (n.d.). *Trabajabilidad Concreto Normal*. Retrieved from <http://cemexparaindustriales.com/trabajabilidad-concreto-normal/#:~:text=La%20trabajabilidad%20del%20concreto%20normalmente,menos%20fluidez%20tiene%20menos%20trabajabilidad>.

Chinga García, N. G., Boulangger Neira, J. P., & Rumiche Chavez, C. A. (2015, Octubre 14). *Cohesividad*. Retrieved from Propiedades del concreto.

Dominic, B. N. (2019, Enero). *CursosOnlineWeb.com*. Retrieved from <https://cursosonlineweb.com/cemento-hidraulico.html>

Ecoembes. (2021, August 29). *Cómo podemos reciclar el PET*. Ecoembes Dudas Del Reciclaje. <https://ecoembesdudasreciclaje.es/reciclar-pet/#:~:text=%C2%BFSe%20puede%20reciclar%20el%20PET,almacenar%20alimentos%20la%20primera%20vez>.

Ecoembes. (2021, Noviembre 26). *¿Qué es exactamente el PET?* Retrieved from Ecoembes como reciclar: <https://ecoembesdudasreciclaje.es/que-es-exactamente-el-pet/#:~:text=El%20PET%20que%20responde%20a,es%20un%20derivado%20del%20petr%C3%B3leo>.

Fernández, A. T. (2013, octubre 18). *La evolución de la construcción y sus materiales*. Retrieved from <https://obras.expansion.mx/arquitectura/2013/10/29/la-evolucion-de-la-construccion-y-sus-materiales>

Gr, L. (2019, Agosto 26). *leonardo*. Retrieved from <https://www.leonardo-gr.com/es/blog/qu-podemos-hacer-con-el-pl-stico-reciclado>

Greenpeace. (2019). *Situación actual de los plásticos en Colombia y su impacto en el medio ambiente*. Bogotá. Retrieved from http://greenpeace.co/pdf/2019/gp_informe_plasticos_colombia_02.pdf

ICONTEC. (1994). NTC 1776. *Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados*, 1-6.

ICONTEC. (1997). NTC 4026. *Ingeniería civil y arquitectura. Unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería estructural.*, 1-9.

ICONTEC. (1997). NTC 4026. *Ingeniería civil y arquitectura. Unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería no estructural interior y chapas de concreto.*, 1-7.

ICONTEC. (2010). NTC 673. *Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*, 1-17.

IMCYC. (n.d.). *Propiedades del concreto*. Retrieved from <http://www.imcyc.com/cyt/julio04/CONCEPTOS.pdf>

Intecnova. (2021). *LA CONSTRUCCIÓN EN COLOMBIA Y SU EVOLUCIÓN*. Retrieved from <https://intecnova.co/blogitem/3/la-construccion-en-colombia-y-su-evolucion#:~:text=La%20construcci%C3%B3n%20ha%20sido%20uno,impulsor%20de%2>

0la%20econom%C3%ADa%20nacional.&text=Durante%202017%2C%20el%20acumulad
o%20anual,entre%20edificaciones%20y%20obras%20

PÉREZ, J. E. (2019). *CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL CONCRETO SIMPLE*. Bogotá.

PETRA. (n.d.). *An Introduction to PET (polyethylene terephthalate)*. Retrieved from http://www.petresin.org/news_introtoPET.asp#:~:text=PET%20is%20completely%20recyclable%2C%20and,States%20each%20year%20for%20recycling.

PI (Pavement Interactive) . (n.d.). *ACI Mix Design*. Retrieved from <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/mix-design/aci-mix-design/>

Ramírez, M. (2020). Investigadores estudian la durabilidad del concreto en México. *Transferencia TEC*, 1-2.

Redes, L. (2019). *¿Qué podemos hacer con el plástico reciclado?* Gestión de Residuos Valencia. <https://www.leonardogr.com/en/node/327#:~:text=La%20agricultura%2C%20la%20obra%20civil,o%20semilleros%2C%20entre%20otros%20productos>.

REINAR SA. (2017, Julio 25). *Concreto Hidráulico*. Retrieved from <https://www.reinarsa.com/2017/07/25/concreto-hidraulico/>

Riquett Ramón, A. A. (2018). *Concreto de alto desempeño*. Barranquilla.

SEGRERA LEÓN, V. D., & COAVAS TEJADA, A. (2020). *ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL CONCRETO CON*. Cartagena.

Semana, R. (2019, Noviembre 9). *Semana*.

Semana, R. (2019, Septiembre 11). *Semana*. Retrieved from <https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/que-sucedo-con-el-reciclaje-de-botellas-pet-en-colombia/46691/>

Servei Estacio. (n.d.). *¿Qué es el PET? Características, usos y aplicaciones*. Retrieved from <https://serveiestacio.com/blog/que-es-el-pet/>

Servei Estació. (2021, Julio 7). *¿QUÉ ES EL PET? CARACTERÍSTICAS, USOS Y APLICACIONES*. Retrieved from <https://serveiestacio.com/blog/que-es-el-pet/>

Techlabsystems. (n.d.). *ASTM C293*. Retrieved from <https://www.metrotec.es/normas/astm/astm-c293/>

Vacuelde Payá, M., Marco Serrano, E., Jardón Giner, R., & Gil, A. A. (n.d.). *Evolución de la resistencia del hormigón con la edad y la temperatura*. Retrieved from <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12793/Evoluci%F3n%20resistencia%20hormig%F3n.pdf?sequence=3#:~:text=Es%20decir%2C%20a%20los%203,%2C%20del%2065%25%2C%20etc.>

Wikipedia. (n.d.). *Máquina universal*. Retrieved from https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina_universal

Yirda, A. (2021, Febrero 1). *Definición de concreto*. Retrieved from [ConceptoDefinición: https://conceptodefinicion.de/concreto/](https://conceptodefinicion.de/concreto/)

Anexos

En los anexos se presentan los ensayos realizados para los agregados finos y gruesos, necesarios para elaborar la mezcla, además del paso a paso del diseño de la mezcla de concreto de acuerdo a las probetas realizadas y finalmente las resistencias obtenidas en los ensayos de flexión y compresión.

Anexo A. Ensayos realizados según norma y resultados obtenidos

Las normativas usadas para cada ensayo se pueden observar en la Tabla 14 (Normativas para los ensayos de caracterización de los agregados):

Ensayo	Norma
Masa unitaria (agregado grueso)	NTC 92
Módulo de finura (agregado fino)	NTC 174
Densidad del agregado grueso	NTC 176
Densidad del agregado fino	NTC 237
Absorción del agregado grueso	NTC 176
Absorción del agregado fino	NTC 237
Humedad del agregado grueso	NTC 1776
Humedad del agregado fino	NTC 1776

Tabla 42.

Resultados de ensayos para agregado grueso.

Agregado Grueso		
Parámetro	Valor	Unidades
Masa unitaria	1427,42	kg
Densidad	2,44	g/ cm ³
Absorción	2,36	%
Humedad	4,68	%

Tabla 43.

Resultados de ensayos para agregado fino.

Agregado fino		
Parámetro	valor	unidades
Modulo finura	3%	%
Densidad	2,49	g/ cm ³
Absorción	1,3	%
Humedad	4,57	%

Anexo B. Ensayo de masa unitaria para agregado grueso.

Los datos de masa unitaria para agregado grueso se muestran en la Tabla 15 (Resultados del ensayo de masa unitaria compactada):

Ensayo de masa unitaria	
Masa del molde (Kg)	3,51
Agregado + molde (Kg)	10,3
Masa del agregado (Kg)	6,79
Volumen del molde (m ³)	0,005
Masa unitaria (Kg/m ³)	1415,14
Fecha de ensayo	17/08/2022

Anexo C. Ensayo de módulo de finura para agregado fino.

Los datos de módulo de finura para agregado fino se muestran en la Tabla 16 (Granulometría del agregado fino):

Granulometría del agregado fino						
Malla	Masa tamiz (g)	Tamiz + Retenido (g)	Retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
# 4	456	459	3	0,32	0,32	99,68
# 8	403	536	133	14,01	14,33	85,67
# 16	360	466	106	11,17	25,50	74,50
# 30	355	421	66	6,95	32,46	67,54
# 50	297	366	69	7,27	39,73	60,27
# 60	301	387	86	9,06	48,79	51,21
# 80	283	433	150	15,81	64,59	35,41
# 100	285	352	67	7,06	71,65	28,35
# 200	279	425	146	15,38	87,04	12,96
Fondo	244	367	123	12,96	100,00	
TOTAL (g)			949	100,00		
Módulo de finura					3,0	

Anexo D. Ensayo de contenido de humedad para agregado grueso y fino.

Los datos de contenido de humedad para agregado fino se muestran en la Tabla 17 (Porcentaje de humedad del agregado fino):

Agregado Fino	
Masa del recipiente (g)	535
Agregado húmedo (g)	1580
Recipiente + agregado seco (g)	2046
Agregado seco (g)	1511
% Humedad	4,57
Fecha de ensayo	17/08/2022

Los datos de contenido de humedad para agregado grueso se muestran en la Tabla 18 (Porcentaje de humedad del agregado grueso):

Agregado Grueso	
Masa del recipiente (g)	727
Agregado húmedo (g)	358
Recipiente + agregado seco (g)	1069
Agregado seco (g)	342
% Humedad	4,68
Fecha de ensayo	17/08/2022

Anexo E. Diseño de mezcla.

Tabla 44.

Parámetros iniciales de grava y arena.

Parámetros iniciales			
GRAVA		ARENA	
TM (mm)	4,75	MF	3
TMN (mm)	4,75	Densidad. A (Kg/m ³)	2580
Densidad. A (Kg/m ³)	2480	absorción (%)	1,62
MUC (Kg/m ³)	1415,14	Humedad (%)	4,57
absorción (%)	2,3	CEMENTO	
Humedad (%)	4,68	Densidad. (Kg/m ³)	2400

- **Paso 1: Elección de la manejabilidad de la mezcla**

Tabla 45.

Valores de asentamiento recomendados para diferentes estructuras.

Tipo de estructura	Asentamiento, mm	
	Mínimo	Máximo
Zapatas y muros de cimentación reforzado	25	75
Zapatas, cajones y muros de subestructuras sin refuerzo	25	75
Vigas y muros reforzado	25	100
Columnas de edificios	25	100
Pavimentos y losas	25	75
Concreto masivo	25	75

Fuente: ACI 2000

$$\text{Asentamiento} = 2,5 \text{ cm}$$

- **Paso 2: Elección del TMN del agregado grueso**

Figura 17.

Restricciones al TMN por las dimensiones del elemento.

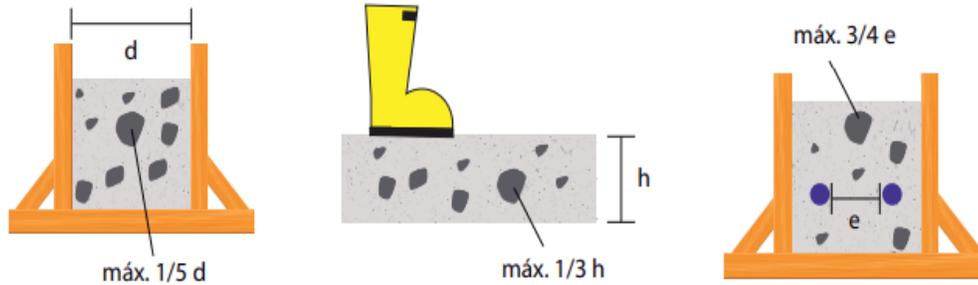


Figura 8.1. Restricciones al TMN por las dimensiones del elemento, según NSR - 10²

Fuente: Pérez, J. E., 2019

$$TMN = 19mm$$

- **Paso 3: Determinación del contenido de aire**

Tabla 46.

Contenido aproximado de aire en el concreto para varios grados de exposición.

TMN (mm)	% Promedio aproximado de aire atrapado
4,75	2,8
9,5	2,7
12,5	2,5
19	2
25	1,7
38	1,5

Fuente: ACI 2000

Tabla 47.

Contenido total de aire para concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo.

TMN (mm)	Contenido total del aire en %	
	Exposición Clase F2 y F3	Exposición Clase F1
4,75	7,5	5,9
9,5	7,5	6
12,5	7	5,5
19	6	5
25	6	4,5
38	5,5	4,5

Fuente: ACI 2000

$$\text{Contenido total de aire} = 2,0\%$$

- **Paso 4: Determinación de la cantidad de agua de mezcla (a)**

Para hallar el contenido de agua, se tiene en cuenta la Figura 6, se accede por el eje de las ordenadas, que representan el asentamiento (obtenido en el paso 1), se encuentra con la curva del TMN, dependiendo de si son agregados de textura lisa (línea continua) o textura angular (línea punteada), y se baja perpendicularmente hasta cortar el eje de las abscisas, que indica la cantidad de agua requerida, en kg/m³ de concreto.

$$\text{Cantidad de agua} = 185 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- **Paso 5: elección de la relación agua/cemento (a/c) o agua/material cementante (a/mc)**

$$\frac{a}{c} = 0,6$$

En la Tabla 21 (Resistencia de la mezcla de concreto), se muestran los datos de resistencia del concreto:

F'c	Mpa	12
	Kg/cm2	122
F'cr	Mpa	19
	Kg/cm2	194

• **Paso 6: Cálculo del contenido de cemento**

$$c = 308 \frac{kg}{m^3}$$

• **Paso 7: Estimación del contenido de agregado grueso (grava)**

Tabla 48.

Valores de b/b_0 para diferentes módulos de finura de la arena y TMN de la grava.

TMN de la grava, mm	Módulo de finura de la arena											
	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1
4,75	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33
9,5	0,50	0,49	0,48	0,47	0,46	0,45	0,44	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39
12,5	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55	0,54	0,53	0,52	0,51	0,50	0,49	0,48
19	0,69	0,68	0,67	0,66	0,65	0,64	0,63	0,62	0,61	0,60	0,59	0,58
25	0,74	0,73	0,72	0,71	0,70	0,69	0,68	0,67	0,66	0,65	0,64	0,63
38	0,80	0,79	0,78	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73	0,72	0,71	0,70	0,69
50	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,78	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73	0,72
75	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,78	0,77
150	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83

Fuente: ACI 2000

$$MF = 3$$

$$\frac{b}{b_0} = 0,32$$

$$b_o = 0,57$$

$$\text{Volumen de agregado grueso} = 0,34 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

- **Paso 8: Cálculo del contenido de agregado fino (arena)**

En la Tabla 23 (Total, materiales para la mezcla), muestran los datos de volumen y masa de los materiales de la mezcla de concreto:

	Volumen (m ³ /m ³)	Masa (kg/ m ³)
Aire	0,00	0
Agua	0,19	185
cemento	0,13	308
A. grueso	0,34	835
A. fino	0,35	903
Σ	1,00	

- **Paso 9: Ajuste por humedad de los agregados**

$$\text{Agua ajustado (kg)} = 138,50 = 0,13850$$

Tabla 49.

Variables de diseño para un concreto de 12 Mpa según la ACI.

Variables de diseño para concreto de 12 MPa	
Asentamiento (cm)	2,5
TMN (mm)	19
Contenido total de aire (%)	2,0
Cantidad de agua (Kg/m ³)	138,50
a/c	0,6
c (kg/m ³)	308
A. grueso (Kg/m ³)	834,9
A. fino (Kg/m ³)	902,6
Cantidad de PET (Kg/m ³)	2,8
Fecha del diseño	29/08/2022

En la Tabla 24 (Volumen de concreto necesario para la realización de probetas) se muestra el volumen requerido de las probetas cilíndricas y las vigas:

Probetas cilíndricas			Vigas	
Altura (m)	0,2	0,3	Área transversal (m ²)	0,0256
Diámetro (m)	0,1	0,15	Largo	0,55
Volumen (m ³)	0,0016	0,0053	Volumen (m ³)	0,0141

$$\text{Total PET} = 2,76 \text{ kg}$$

$$\text{Total PET} = 0,003 \text{ m}^3$$

- **Paso 10. Cantidades de obra**

$$\text{Volumen total del concreto} = 0,428 \text{ m}^3$$

Tabla 50.

Cantidad de material para un volumen de 0,428 m³.

Valor	m ³ /m ³	kg/m ³	kg/m ³ + perdidas
Aire	0,00	0,00	0,00
Agua	0,06	59,28	60,47
cemento	0,05	131,98	134,62
A. grueso	0,14	357,39	364,54
A. fino	0,15	386,37	394,10

$$\text{Volumen de concreto para cada PET} = 0,107 \text{ m}^3$$

En la Tabla 27 (Cantidad de material para elaborar las probetas con 0% de fibra de PET), se muestran las cantidades requeridas para diseñar probetas de concreto con 0% de fibras PET:

Concreto con 0% de fibra de PET			
Valor	m ³	kg/m ³	kg/m ³ + perdidas
Aire	0,00	0,00	0,00
Agua	0,01	14,82	15,12

Concreto con 0% de fibra de PET			
Valor	m3	kg/m3	kg/m3 + perdidas
cemento	0,01	33,00	33,65
A. grueso	0,04	89,35	91,13
A. fino	0,04	96,59	98,52

- **Paso 11. Cantidades con PET**

La cantidad de las probetas de concreto para los ensayos se observan en la Tabla 26 (Cantidad de probetas de concreto):

Cantidad de probetas para los ensayos			
PET	Cilindros pequeños	Cilindros grandes	Vigas
5%	9	3	8
3%	9	3	8
0%	9	3	8
Total	27	9	24
Volumen Total(m3)	0,042	0,048	0,338

$$Densidad\ PET = 940 \frac{kg}{m^3}$$

En la Tabla 29 (Cantidad de material para elaborar las probetas con 5% de fibra de PET), se muestran las cantidades requeridas para diseñar probetas de concreto con 5% de fibras PET:

Concreto con 5% de fibra de PET			
Valor	m3	kg	kg + perdidas
Aire	0,00	0,00	0,00
Agua	0,01	14,82	15,12
cemento	0,01	33,00	33,65
A. grueso	0,03	84,88	86,58
A. fino	0,04	96,59	98,52
PET	0,00	1,69	1,73

En la Tabla 28 (Cantidad de material para elaborar las probetas con 3% de fibra de PET), se muestran las cantidades requeridas para diseñar probetas de concreto con 3% de fibras PET:

Concreto con 3% de fibra de PET			
Valor	m3	kg	kg + perdidas
Aire	0,00	0,00	0,00
Agua	0,01	14,82	15,12
cemento	0,01	33,00	33,65
A. grueso	0,03	86,67	88,40
A. fino	0,04	96,59	98,52
PET	0,00	1,02	1,04

Anexo F. Ensayo de resistencia a flexión.

En el ensayo de resistencia a flexión de las probetas se obtuvieron los siguientes resultados:

En la Tabla 32 (Resistencia a la flexión de los concretos a los 7 días) se observan los siguientes resultados:

Primer ensayo a flexión (Edad = 7 días)			
Concreto	Datos	Viga 1	Viga 2
5% PET	Ancho (cm)	15,5	15,5
	Alto (cm)	15,5	15,5
	Largo (cm)	54,5	53,5
	Masa (Kg)	26,54	25,94
	Fuerza (kN)	21,17	21,87
	Resistencia (MPa)	4,24	4,23
3% PET	Ancho (cm)	15,5	15,5
	Alto (cm)	15,5	15,5
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	27,28	27
	Fuerza (kN)	22,75	22,5
	Resistencia (MPa)	4,99	4,98
0% PET	Ancho (cm)	15,5	15
	Alto (cm)	16	15,5
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	27,74	26,42
	Fuerza (kN)	19,42	17,84
	Resistencia (MPa)	4,04	4,08

En la Tabla 34 (Resistencia a la flexión de los concretos a los 14 días) se observan los siguientes resultados:

Segundo ensayo a flexión (Edad = 14 días)			
Concreto	Datos	Viga 1	Viga 2
5% PET	Ancho (cm)	15,5	15,5
	Alto (cm)	15,5	15,5
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	26,7	26,3
	Fuerza (kN)	20,12	20,46
	Resistencia (MPa)	4,19	4,26
3% PET	Ancho (cm)	15	15

Segundo ensayo a flexión (Edad = 14 días)			
Concreto	Datos	Viga 1	Viga 2
0% PET	Alto (cm)	15,5	15,5
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	27,44	27,26
	Fuerza (kN)	23,9	23,7
	Resistencia (MPa)	4,99	4,93
	Ancho (cm)	15,7	15,7
	Alto (cm)	15,7	15,7
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	27,48	26,84
	Fuerza (kN)	22,5	23,09
Resistencia (MPa)	3,92	4,03	

En la Tabla 36 (Resistencia a la flexión de los concretos a los 21 días) se observan los siguientes resultados:

Tercer ensayo a flexión (Edad = 21 días)			
Concreto	Datos	Viga 1	Viga 2
5% PET	Ancho (cm)	15,3	15,3
	Alto (cm)	16	16
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	26,22	26,22
	Fuerza (kN)	25,09	25,09
	Resistencia (MPa)	5,28	5,28
3% PET	Ancho (cm)	15,5	15,5
	Alto (cm)	15,5	15,5
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	28,08	28,08
	Fuerza (kN)	28,73	28,73
0% PET	Resistencia (MPa)	5,67	5,67
	Ancho (cm)	15,5	15,5
	Alto (cm)	15	15
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	27,02	27,02
0% PET	Fuerza (kN)	19,02	19,02
	Resistencia (MPa)	4,13	4,13

En la Tabla 38 (Resistencia a la flexión de los concretos a los 28 días) se observan los siguientes resultados:

Cuarto ensayo a flexión (Edad = 28 días)			
Concreto	Datos	Viga 1	Viga 2
5% PET	Ancho (cm)	15,5	15,5
	Alto (cm)	15,5	15,5
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	26,84	26,84
	Fuerza (kN)	27,89	27,89
	Resistencia (MPa)	5,73	5,73
3% PET	Ancho (cm)	15,5	15,5
	Alto (cm)	15,5	15,5
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	27,38	27,38
	Fuerza (kN)	32,13	32,13
	Resistencia (MPa)	6,34	6,34
0% PET	Ancho (cm)	15,5	15,5
	Alto (cm)	15,5	15,5
	Largo (cm)	54,5	54,5
	Masa (Kg)	27,26	27,26
	Fuerza (kN)	22,35	22,35
	Resistencia (MPa)	15,5	15,5

En la Tabla 40 (Resultados promedio de resistencia a la flexión de los concretos) se observan los siguientes resultados:

Resistencia promedio a la flexión del concreto (MPa)				
Edad (días)	7	14	21	28
Concreto con 5% PET	4,24	4,23	5,43	5,42
Concreto con 3% PET	4,99	4,96	5,69	6,10
Concreto normal (0% PET)	4,06	3,98	4,13	4,47

Anexo G. Ensayo de resistencia a compresión.

En el ensayo de resistencia compresión de las probetas se obtuvieron los siguientes resultados:

En la Tabla 31; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (Resistencia a la compresión de los concretos a los 7 días) se observan los siguientes resultados:

Primer ensayo a Compresión (Edad = 7 días)				
Concreto	Datos	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
5% PET	Diámetro (cm)	10	10	10
	Alto (cm)	20,2	20	20
	Masa (Kg)	3,46	3,38	3,48
	Fuerza (kN)	138,04	143,39	138,51
	Resistencia (MPa)	17,58	18,26	17,64
3% PET	Diámetro (cm)	15	15	15
	Alto (cm)	30	30	30
	Masa (Kg)	12,04	12,06	12,10
	Fuerza (kN)	128,03	146,58	215,18
	Resistencia (MPa)	6,78	7,77	11,40
0% PET	Diámetro (cm)	15	15	15
	Alto (cm)	30	30	30
	Masa (Kg)	11,48	11,68	11,56
	Fuerza (kN)	69,91	74,06	74,98
	Resistencia (MPa)	3,96	4,19	4,24

En la Tabla 33 (Resistencia a la compresión de los concretos a los 14 días) se observan los siguientes resultados:

Segundo ensayo a Compresión (Edad = 14 días)				
Concreto	Datos	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
5% PET	Diámetro (cm)	15,6	15,9	15,4
	Alto (cm)	31	31	30,1
	Masa (Kg)	11,6	11,7	11,6
	Fuerza (kN)	355,8	359,37	338,89
	Resistencia (MPa)	18,62	18,1	18,19
3% PET	Diámetro (cm)	10	10	15
	Alto (cm)	20,5	20,5	30
	Masa (Kg)	3,6	3,6	12,12
	Fuerza (kN)	97,9	100,88	223,34
	Resistencia (MPa)	12,47	12,84	12,64

Segundo ensayo a Compresión (Edad = 14 días)				
Concreto	Datos	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
0% PET	Diámetro (cm)	10,1	10,4	10,1
	Alto (cm)	20	20,4	20,5
	Masa (Kg)	3,42	3,43	3,4
	Fuerza (kN)	53,24	54,97	49,99
	Resistencia (MPa)	6,65	6,47	6,24

En la Tabla 35 (Resistencia a la compresión de los concretos a los 21 días) se observan los siguientes resultados:

Tercer ensayo a Compresión (Edad = 21 días)				
Concreto	Datos	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
5% PET	Diámetro (cm)	10,5	10,3	10,2
	Alto (cm)	20,5	20,7	20,5
	Masa (Kg)	3,5	3,5	3,42
	Fuerza (kN)	176,34	168,87	164,69
	Resistencia (MPa)	20,36	20,27	20,15
3% PET	Diámetro (cm)	10	10	10
	Alto (cm)	20	20	20
	Masa (Kg)	3,52	3,56	3,58
	Fuerza (kN)	113,17	104,97	94,25
	Resistencia (MPa)	14,41	13,37	12
0% PET	Diámetro (cm)	9,6	10	10
	Alto (cm)	20,5	20,5	20,5
	Masa (Kg)	3,24	3,3	3,38
	Fuerza (kN)	77,9	79,64	76,7
	Resistencia (MPa)	10,76	10,14	9,77

En la Tabla 37 (Resistencia a la compresión de los concretos a los 28 días) se observan los siguientes resultados:

Cuarto ensayo a Compresión (Edad = 28 días)				
Concreto	Datos	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
5% PET	Diámetro (cm)	10	10	10
	Alto (cm)	20,5	20,5	20,5
	Masa (Kg)	3,48	3,48	3,48
	Fuerza (kN)	169,05	169,05	169,05
	Resistencia (MPa)	21,52	21,52	21,52
3% PET	Diámetro (cm)	10	10	10
	Alto (cm)	20,5	20,5	20,5
	Masa (Kg)	3,52	3,52	3,52

Cuarto ensayo a Compresión (Edad = 28 días)				
Concreto	Datos	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
0% PET	Fuerza (kN)	128,2	128,2	128,2
	Resistencia (MPa)	16,32	16,32	16,32
	Diámetro (cm)	10	10	10
	Alto (cm)	20.5	20.5	20.5
	Masa (Kg)	3,42	3,42	3,42
	Fuerza (kN)	103,04	103,04	103,04
	Resistencia (MPa)	13,12	13,12	13,12

En la Tabla 39 (Resultados promedio de resistencia a la compresión de los concretos) se observan los siguientes resultados:

Resistencia promedio a la compresión del concreto (MPa)				
Edad (días)	7	14	21	28
Concreto con 5% PET	17,83	18,30	20,26	22,10
Concreto con 3% PET	8,65	12,65	13,26	17,00
Concreto normal (0% PET)	4,13	6,45	10,22	13,24