

**Evaluación de la incorporación de Tereftalato de polietileno (PET) reciclado y  
Furcraea andina (Fique) en la producción de concreto**

**Carlos Fabian Alvarado Salinas y Jhon Jairo García Hoyos**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil**

**Director**

**Isis Karina Torres Ayala**

**Magíster en Ingeniería civil, enfocado en diseño estructural**

**Universidad Santo Tomas, Bucaramanga**

**División de Ingeniería y Arquitectura**

**Facultad de Ingeniería Civil**

**2023**

### **Dedicatoria**

A mi familia, por su apoyo inquebrantable y comprensión durante las largas horas de estudio.

A mis profesores y asesores, cuyos conocimientos y orientación fueron fundamentales para este logro.

A mi compañero de investigación, por su colaboración y dedicación.

A la naturaleza y el medio ambiente, que nos inspiran a buscar soluciones sostenibles y responsables.

Este trabajo está dedicado a todos ustedes, con gratitud y aprecio.

*Carlos Fabian Alvarado Salinas*

A mi familia, por su apoyo, motivación, fortaleza, comprensión y respaldo que fueron de ayuda importante para este logro en mi carrera.

A mis profesores, por brindarme cada uno de sus conocimientos y experiencias en cada uno de los espacios y su orientación a lo largo de toda la carrera.

A mi compañero de investigación y carrera, por su colaboración, dedicación, y apoyo durante este proceso de investigación y cada uno de los semestre cursados.

*Jhon Jairo García Hoyos*

### **Agradecimientos**

A la MSc. Ing. Isis Torres por su guía experta y apoyo continuo a lo largo de este proyecto. Sus consejos, conocimientos y paciencia fueron fundamentales para el éxito de esta investigación.

A nuestro compañero y amigo Iván Vecino por su colaboración en la realización de la etapa practica del proyecto.

A nuestra amiga y colega Paula Camargo por su apoyo en la elaboración del informe del proyecto.

## Contenido

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción.....                                                                                                                            | 13 |
| 1. Evaluación de la incorporación de Tereftalato de polietileno (PET) reciclado y Furcraea andina (Fique) en la producción de concreto ..... | 15 |
| 1.1 Planteamiento del problema .....                                                                                                         | 15 |
| 1.2 Objetivos .....                                                                                                                          | 16 |
| 1.2.1 Objetivo general .....                                                                                                                 | 16 |
| 1.2.2 Objetivos específicos.....                                                                                                             | 16 |
| 1.3 Justificación .....                                                                                                                      | 17 |
| 2. Estado del Arte .....                                                                                                                     | 18 |
| 2.1 Marco teórico .....                                                                                                                      | 18 |
| 2.1.1 Factores ambientales afectados debido al proceso de fabricación del uso del concreto.....                                              | 18 |
| 2.1.2 Análisis del comportamiento de un elemento estructural con adición de fibras de fique.....                                             | 22 |
| 2.1.3 Ensayos de resistencia del concreto.....                                                                                               | 23 |
| 2.1.4 Ensayos para el diseño de mezcla.....                                                                                                  | 25 |
| 2.2 Marco conceptual.....                                                                                                                    | 29 |
| 2.3 Marco legal .....                                                                                                                        | 33 |
| 2.4 Marco de Antecedentes.....                                                                                                               | 34 |
| 3. Metodología.....                                                                                                                          | 36 |
| 3.1 Metodología.....                                                                                                                         | 36 |
| 3.1.1 Fase de búsqueda de información (FASE 1) .....                                                                                         | 37 |
| 3.1.2 Fase de búsqueda de materiales (FASE 2).....                                                                                           | 37 |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.3 Fase de ensayos de caracterización de materiales (FASE 3).....                   | 37 |
| 3.1.4 Diseño de mezcla (FASE 4) .....                                                  | 37 |
| 3.1.5 Fase de ensayos (Vigas y cilindros) (FASE 5) .....                               | 38 |
| 3.1.6 Fase de Interpretación de resultados (FASE 6).....                               | 39 |
| 3.1.7 Fase del informe (FASE 7).....                                                   | 39 |
| 3.2 Desarrollo metodológico.....                                                       | 39 |
| 4. Materiales .....                                                                    | 40 |
| 4.1 Selección de materiales.....                                                       | 40 |
| 4.2 Descripción de materiales .....                                                    | 41 |
| 4.2.1 Agregado grueso (Grava).....                                                     | 41 |
| 4.2.2 Agregado fino (Arena).....                                                       | 42 |
| 4.2.3 Cemento Portland tipo 1 .....                                                    | 43 |
| 4.2.4 Tereftalato de polietileno (PET) reciclado.....                                  | 44 |
| 4.2.5 Furcraea andina (Fique).....                                                     | 45 |
| 5. Mezcla de concreto.....                                                             | 47 |
| 5.1 Herramientas y equipos.....                                                        | 47 |
| 5.2 Ensayos de materiales.....                                                         | 48 |
| 5.2.1 Ensayo de granulometría de agregados .....                                       | 48 |
| 5.2.2 Gravedad específica de agregado fino y Absorción de humedad .....                | 49 |
| 5.2.3 Peso unitario de agregado fino.....                                              | 50 |
| 5.2.4 Gravedad específica de agregado grueso y Absorción de humedad.....               | 51 |
| 5.2.5 Peso unitario de agregado grueso .....                                           | 52 |
| 5.3 Diseño de mezcla según la norma ACI 211 .....                                      | 52 |
| 5.4 Elaboración de mezclas de concreto y fundición de probetas (Vigas – Cilindros).... | 54 |

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.5 Procedimiento de la elaboración de la mezcla de concreto (Concreto convencional – Concreto + fique + PET) .....                                             | 55 |
| 6. Ensayos de probetas de concreto (Vigas – Cilindros).....                                                                                                     | 61 |
| 6.1 Comparativa entre las probetas (Cilindros y vigas) obtenidas.....                                                                                           | 62 |
| 7. Análisis de resultados .....                                                                                                                                 | 63 |
| 7.1 Ensayos a compresión de cilindros.....                                                                                                                      | 63 |
| 7.2 Ensayos a flexión de vigas .....                                                                                                                            | 68 |
| 7.3 Análisis de costos de cilindros y vigas en concreto convencional y concreto con adición de tereftalato de Polietileno (PET) y furcraea andina (fique). .... | 71 |
| 7.3.1 Costo de materiales .....                                                                                                                                 | 72 |
| 8. Conclusiones .....                                                                                                                                           | 73 |
| 9. Recomendaciones .....                                                                                                                                        | 75 |
| Referencias.....                                                                                                                                                | 77 |

**Lista de tablas**

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> <i>Tipo de mezcla, numero de cilindro y vigas</i> .....                              | 38 |
| <b>Tabla 2.</b> <i>Números de cilindros con respecto al tiempo de curado</i> .....                   | 38 |
| <b>Tabla 3.</b> <i>Números de vigas con respecto al tiempo de curado</i> .....                       | 38 |
| <b>Tabla 4.</b> <i>Ensayos de laboratorio (Vigas – Cilindros)</i> .....                              | 38 |
| <b>Tabla 5.</b> <i>Desarrollo metodológico del proyecto</i> .....                                    | 39 |
| <b>Tabla 6.</b> <i>Materiales del proyecto</i> .....                                                 | 41 |
| <b>Tabla 7.</b> <i>Características del agregado grueso (Grava)</i> .....                             | 42 |
| <b>Tabla 8.</b> <i>Características del agregado fino (Arena)</i> .....                               | 43 |
| <b>Tabla 9.</b> <i>Características del cemento portland tipo 1</i> .....                             | 43 |
| <b>Tabla 10.</b> <i>Características del Tereftalato de polietileno (PET)</i> .....                   | 45 |
| <b>Tabla 11.</b> <i>Características generales del Furcraea andina (Fique)</i> .....                  | 46 |
| <b>Tabla 12.</b> <i>Propiedades mecánicas de furcraea andina (Fique)</i> .....                       | 47 |
| <b>Tabla 13.</b> <i>Herramientas y equipos para la elaboración de concreto</i> .....                 | 48 |
| <b>Tabla 14.</b> <i>Equipos para ensayos de compresión y flexión</i> .....                           | 48 |
| <b>Tabla 15.</b> <i>Resultados de ensayo de granulometría de los agregados finos y gruesos</i> ..... | 49 |
| <b>Tabla 16.</b> <i>Gravedades específicas de agregado fino</i> .....                                | 50 |
| <b>Tabla 17.</b> <i>Pesos unitarios de agregado fino</i> .....                                       | 50 |
| <b>Tabla 18.</b> <i>Gravedades específicas de agregado grueso</i> .....                              | 51 |
| <b>Tabla 19.</b> <i>Pesos unitarios de agregado grueso</i> .....                                     | 52 |
| <b>Tabla 20.</b> <i>Diseño por metro cubico de concreto 3000 psi</i> .....                           | 53 |
| <b>Tabla 21.</b> <i>Dosificación verdadera para la mezcla de concreto</i> .....                      | 54 |
| <b>Tabla 22.</b> <i>Observación comparativa entre los cilindros de las diferentes mezclas</i> .....  | 62 |
| <b>Tabla 23.</b> <i>Observación comparativa entre las vigas de las diferentes mezclas</i> .....      | 63 |

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 24.</b> <i>Datos de ensayo a compresión de cilindros a 7 días</i> .....                                                        | 64 |
| <b>Tabla 25.</b> <i>Datos de resistencia y esfuerzos de cilindros a 7 días</i> .....                                                    | 64 |
| <b>Tabla 26.</b> <i>Datos de ensayo a compresión de cilindros a 14 días</i> .....                                                       | 64 |
| <b>Tabla 27.</b> <i>Datos de resistencia y esfuerzos de cilindros a 14 días</i> .....                                                   | 64 |
| <b>Tabla 28.</b> <i>Datos de ensayo a compresión de cilindros a 28 días</i> .....                                                       | 64 |
| <b>Tabla 29.</b> <i>Datos de resistencia y esfuerzos de cilindros a 28 días</i> .....                                                   | 65 |
| <b>Tabla 30.</b> <i>Tipo de falla de cilindros</i> .....                                                                                | 67 |
| <b>Tabla 31.</b> <i>Datos de ensayo a flexión de vigas a 7 días</i> .....                                                               | 68 |
| <b>Tabla 32.</b> <i>Datos de resistencia y esfuerzos de vigas a 7 días</i> .....                                                        | 68 |
| <b>Tabla 33.</b> <i>Datos de ensayo a flexión de vigas a 28 días</i> .....                                                              | 68 |
| <b>Tabla 34.</b> <i>Datos de resistencia y esfuerzos de vigas a 28 días</i> .....                                                       | 69 |
| <b>Tabla 35.</b> <i>Tipo de falla de vigas</i> .....                                                                                    | 71 |
| <b>Tabla 36.</b> <i>Costo de materiales de concreto convencional</i> .....                                                              | 72 |
| <b>Tabla 37.</b> <i>Costo de materiales de concreto con adición de tereftalato de Polietileno (PET) y furcraea andina (fique)</i> ..... | 72 |

**Lista de figuras**

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> <i>Agregado grueso (grava)</i> .....                                                                                    | 42 |
| <b>Figura 2.</b> <i>Agregado fino (Arena)</i> .....                                                                                      | 43 |
| <b>Figura 3.</b> <i>Cemento Portlan</i> .....                                                                                            | 44 |
| <b>Figura 4.</b> <i>Tereftalato de polietileno (PET) reciclado</i> .....                                                                 | 45 |
| <b>Figura 5.</b> <i>Furcraea andina (Fique)</i> .....                                                                                    | 46 |
| <b>Figura 6.</b> <i>Tintura del fique con colorantes naturales.</i> .....                                                                | 46 |
| <b>Figura 7.</b> <i>Tiras recortadas de fique, tamaño 3 cm</i> .....                                                                     | 47 |
| <b>Figura 8.</b> <i>Condiciones de humedad de los materiales</i> .....                                                                   | 55 |
| <b>Figura 9.</b> <i>Preparación de mezcla</i> .....                                                                                      | 56 |
| <b>Figura 10.</b> <i>Concreto convencional en ensayo de asentamiento</i> .....                                                           | 57 |
| <b>Figura 11.</b> <i>Fundición de cilindros</i> .....                                                                                    | 57 |
| <b>Figura 12.</b> <i>Cilindros y vigas fundidos</i> .....                                                                                | 58 |
| <b>Figura 13.</b> <i>Tiempo de curado cilindros y vigas</i> .....                                                                        | 58 |
| <b>Figura 14.</b> <i>Mezcla del 2 tipo de mezcla con agregados</i> .....                                                                 | 59 |
| <b>Figura 15.</b> <i>Mezcla del concreto con adición de tereftalato de polietileno y furcraea andina</i><br>.....                        | 59 |
| <b>Figura 16.</b> <i>Concreto con adición de tereftalato de polietileno y furcraea andina en ensayo<br/>de asentamiento</i> .....        | 60 |
| <b>Figura 17.</b> <i>Fundiciones de cilindros y vigas con el 2 tipo de mezcla</i> .....                                                  | 60 |
| <b>Figura 18.</b> <i>Tiempo de curado de cilindros de concreto con adición de tereftalato de<br/>polietileno y furcraea andina</i> ..... | 61 |
| <b>Figura 19.</b> <i>Ensayos de probetas a flexión y compresión</i> .....                                                                | 61 |

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 20.</b> <i>Comparación de esfuerzos a través de la mezcla convencional y la mezcla con agregados.....</i>                                                     | 65 |
| <b>Figura 21.</b> <i>Comparación de resistencia de cilindros a través de la mezcla convencional y la mezcla con agregados.....</i>                                      | 66 |
| <b>Figura 22.</b> <i>Comparación de esfuerzos a través de la mezcla convencional y la mezcla con agregados.....</i>                                                     | 69 |
| <b>Figura 23.</b> <i>Comparación de resistencia a través de la mezcla convencional y la mezcla con agregados.....</i>                                                   | 70 |
| <b>Figura 24.</b> <i>Comparación de costos del concreto convencional con el concreto con adición de tereftalato de Polietileno (PET) y furcraea andina (fique).....</i> | 73 |

### **Resumen**

Los procesos constructivos de una edificación se componen principalmente de la estructura en la cual cada elemento de diseño presenta unos estándares establecidos en la cual estos se deben seguir y cumplir a cabalidad con las normativas de diseño existentes. A partir de esto se realizará una serie de ensayos que midan la consistencia de probetas, las cuales a través de la implementación de nuevos materiales se determinara un comportamiento adecuado que genere mayor resistencia en las edificaciones dependiendo a su vez de cada elemento de los factores de análisis y planificación de las estructuras, con el fin de generar una transformación beneficiosa en la industria de la construcción que conduce a una drástica reducción en la influencia de factores contaminantes debido a los diferentes agregados y componentes que se emplean en la producción del concreto industrial y de la misma manera mejorar las propiedades mecánicas en la elaboración del mismo, donde se buscan nuevos materiales sostenibles que contribuyan de una manera distinta en el desarrollo de la elaboración de los procesos industrializados y en la construcción de estructuras. Una vez realizada la mezcla de concreto se encofrará en viguetas y cilindros, donde posteriormente se dejará un tiempo de fraguado que con base a lo establecido por las normativas sismorresistente. Por otra parte, una vez alcanzado los días de fraguado de la mezcla en los cilindros y viguetas se llevará a las máquinas de pruebas de compresión y de flexión donde se hará revisión de su comportamiento y su resistencia con la mezcla del concreto, el plástico y el fique.

*Palabras claves:* estructura, plástico, medioambiente, fibra natural, contaminación, resistencia

### **Abstract**

The construction processes of a building mainly consist of the structure, in which each design element adheres to established standards that must be followed in full compliance with existing design regulations. Based on this, a series of tests will be conducted to measure the consistency of specimens. Through the implementation of new materials, an appropriate behavior will be determined, generating greater strength in buildings, depending on each element of the factors for structural analysis and planning. This aims to bring about a beneficial transformation in the construction industry, leading to a drastic reduction in the influence of contaminating factors due to the different aggregates and components used in industrial concrete production. Similarly, it aims to enhance the mechanical properties in concrete production, seeking sustainable materials that contribute differently to the development of industrialized processes and structural construction. Once the concrete mix is prepared, it will be cast into beams and cylinders, where it will be allowed to cure for a specified time according to seismic-resistant regulations. Furthermore, after reaching the curing days for the mix in the cylinders and beams, they will be subjected to compression and flexural testing machines to assess their performance and strength in relation to the concrete, plastic, and fique blend.

*Keywords:* structure, plastic, environment, natural fiber, pollution, resistance

### **Introducción**

En búsqueda de la implementación hacia la construcción del desarrollo sostenible promoviendo alternativas donde se establezcan los aspectos necesarios para un mejor desarrollo sostenible tanto en el ámbito social, ambiental y económico; de tal manera que se contribuya a la utilización de materiales renovables en procedimientos constructivos en el campo que generen un cambio radical desde todo punto de vista, principalmente en la manera que se extraen los recursos y posteriormente se emplean a dichos procesos de fabricación de materiales.

En la actualidad sabemos que el problema de la contaminación tiene como causa un gran porcentaje la industria de la construcción generando un alto porcentaje de contaminantes, por ende, figura entre los principales demandantes de recursos naturales, incluyendo agua, madera y minerales, en gran cantidad. Muchos de los procesos constructivos requeridos que se emplean en las obras requieren de la utilización de materiales, recursos contaminantes y otros que debido al proceso de extracción, fabricación y elaboración generan gran impacto negativo afectando en gran proporción al medio ambiente.

Sin embargo, se utilizará fique y plástico (PET), teniendo en cuenta las características de cada material y su resistencia, con el propósito de potenciar las cualidades del concreto. Se incorporará un 1.5% de fique y un 3% de plástico (PET) en la mezcla, que se preparará en el laboratorio junto con sus componentes habituales, incluyendo estos materiales sostenibles. Una vez realizada la mezcla de concreto se encofrará está en las viguetas y cilindros, donde posteriormente se dejará un tiempo de fraguado que con base a lo establecido por las normativas sismorresistente en la cual se requiere su mayor resistencia a los 28 días. Por otra parte, una vez alcanzado los días de

fraguado de la mezcla en los cilindros y viguetas se llevará a las máquinas de pruebas de compresión y de flexión donde se hará revisión de su comportamiento y su resistencia de las probetas con la mezcla del concreto mediante la adición de materiales renovables. Posteriormente, se llevará a cabo una evaluación de los resultados obtenidos para determinar si la combinación de materiales es adecuada para su uso en la industria o no.

## **1. Evaluación de la incorporación de Tereftalato de polietileno (PET) reciclado y Furcraea andina (Fique) en la producción de concreto**

### **1.1 Planteamiento del problema**

Durante un largo período de tiempo, el concreto ha mantenido su posición como uno de los materiales más empleados en la industria de la construcción, ya que posee una alta resistencia a los esfuerzos de compresión, requiere muy poco mantenimiento, es duradero y cuenta con una extensa gama de usos. Sin embargo, la fabricación y el uso del concreto también presenta diversos desafíos ambientales y sociales.

Una de las principales preocupaciones ecológicas asociadas al concreto es su influencia en las emisiones de gases de efecto invernadero, específicamente en lo que respecta al dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). El proceso de fabricación del concreto requiere la utilización de cemento, que contribuye significativamente a una considerable cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>, también utiliza una gran cantidad de energía en los hornos de producción. Además, el transporte y la manipulación del concreto pueden generar polvo y partículas que afectan la pureza del aire y su influencia en la salud humana pueden verse afectadas de manera perjudicial [1].

Otro desafío social asociado con el concreto es su ciclo de vida limitado. Las edificaciones construidas con concreto eventualmente se deterioran y deben ser demolidas, esto resulta en una abundancia de desechos que pueden ser complicados de gestionar y que pueden tener un impacto adverso en las comunidades locales. Para enfrentar estas dificultades, es esencial explorar opciones más respetuosas con el entorno y sostenibles en la

producción y aplicación del concreto. Una posible solución es la utilización de materiales renovables y reutilizables que no generen una gran cantidad de residuos y emisiones.

En este sentido, el Tereftalato de Polietileno (PET) reciclado y el Furcraea andina (Fique) se presentan como dos alternativas prometedoras. El PET es un material de alta resistencia y rigidez, que no presenta corrosión, es resistente al desgaste, a los impactos y a la rotura, y también tiene una buena resistencia química [2].

En contraste, el Fique es una fibra biodegradable que se puede emplear como un agente de fortalecimiento en materiales de construcción. Gracias a sus características, ofrece una producción más ecológica y no conlleva contaminación del agua. Sin embargo, es esencial llevar a cabo un análisis exhaustivo de las propiedades mecánicas del concreto resultante de estos materiales alternativos, así como evaluar el impacto ambiental generado durante su producción y aplicación en la construcción. Esto se realiza con el propósito de determinar si representan una opción sostenible viable para la industria de la construcción.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 *Objetivo general***

Analizar la viabilidad de la incorporación de fibra de furcraea andina (Fique) y tereftalato de polietileno (PET) reciclado en la producción de concreto y su costo-beneficio, en comparación con concreto convencional.

### **1.2.2 *Objetivos específicos***

- Determinar la resistencia a la flexión de las viguetas y los cilindros mediante la adición de 1.5% de fibra de fique y 3% de PET reciclado al volumen de concreto.

- Realizar una comparativa de las propiedades mecánicas del concreto con la adición de fibra de fique y PET reciclado frente a un concreto convencional, evaluando las resistencias.
- Evaluar el impacto económico de la incorporación de fibra de fique y PET reciclado, analizando la relación costo-beneficio de los materiales.

### **1.3 Justificación**

Esta investigación tiene como finalidad contribuir al desarrollo de procesos industrializados y la edificación de estructuras sostenibles en el ámbito constructivo. El propósito es elevar las características mecánicas del concreto mediante la adopción de novedosos materiales sostenibles. Esto se realiza con la finalidad de cumplir con los criterios y requisitos establecidos en las regulaciones de diseño sismorresistentes, mientras simultáneamente se minimiza la huella ambiental originada por la diversidad de agregados y componentes utilizados en la manufactura de proyectos industriales.

Por esta razón, se propone la utilización del plástico y el fique, materiales que ofrecen una serie de ventajas: como su menor consumo de energía en su producción, ahorro de combustible, alta resistencia, versatilidad, durabilidad y su capacidad de actuar como aislantes eléctricos. La investigación se enfoca en determinar cómo estos materiales pueden ser implementados en la elaboración de elementos no estructurales y cómo afectan su resistencia y sostenibilidad ambiental.

## 2. Estado del Arte

### 2.1 Marco teórico

#### 2.1.1 *Factores ambientales afectados debido al proceso de fabricación del uso del concreto*

**2.1.1.1 Contaminación ambiental.** La problemática de la contaminación ambiental es motivo de profunda inquietud a nivel global. La industria de la construcción figura entre las principales causantes de esta contaminación, ya que la producción de concreto y otras actividades generan una gran cantidad de residuos y emisiones contaminantes. Según Valdés, el concreto es uno de los materiales más ampliamente producidos y utilizados en la construcción de obras civiles, pero también es uno de los mayores generadores de residuos de demolición y desperdicios [3].

Las compañías industriales del sector de la construcción se ubican entre los principales emisores de contaminantes, como resultado de la extracción y procesamiento de materiales, lo cual origina considerables volúmenes de desechos, incluyendo el concreto. Estos desechos suelen ser liberados al entorno de forma poco responsable, generando impactos adversos que no solo afectan al suelo y al agua, sino también al paisaje y a todas las formas de vida que coexisten con estos entornos. La manipulación o empleo de contaminantes producidos por las industrias afecta de manera significativa el ambiente y su salud.

**2.1.1.2 Cambio climático.** La liberación de gases constituye un asunto que incide en la calidad del aire y, en consecuencia, en la salud de los individuos. En lo que respecta a la industria de la construcción, tanto en la manufactura de materiales como en la edificación de estructuras, se originan variadas emisiones de gases que aportan a la polución atmosférica. Como señala Ballester, los contaminantes atmosféricos pueden tener origen móvil, como el tráfico rodado, o fijo, como las industrias, los usos residenciales de climatización y los procesos de eliminación de residuos. En este contexto, los agentes contaminantes se pueden categorizar en dos grupos: los primarios, que se originan directamente de la fuente de emisión, y los secundarios, que se forman mediante procesos químicos en la atmósfera. [1].

Es crucial señalar que estas emisiones no solo afectan la calidad del aire, sino que también pueden tener efectos graves en la salud, especialmente en individuos vulnerables como niños, personas mayores y aquellos con enfermedades respiratorias. Por consiguiente, resulta fundamental que la industria de la construcción adopte medidas para reducir su impacto en el ambiente y en la salud de la población.

**2.1.1.3 Pérdida de recursos naturales.** La construcción figura entre las actividades humanas que más significativamente contribuyen a la producción de desechos peligrosos. Estos residuos pueden tener consecuencias negativas para los ecosistemas y los recursos naturales, ya que suelen ser vertidos de manera irresponsable y pueden contaminar tanto el agua como el suelo. Esto puede afectar gravemente a las especies marinas y terrestres que habitan en estas zonas. Además, la acumulación de estos residuos puede contribuir a la fragmentación y desestabilización de los ecosistemas, lo que puede tener graves consecuencias para la biodiversidad y la sostenibilidad del planeta. Es por esto por lo que es

fundamental que se adopten medidas para reducir la generación de residuos y garantizar que estos sean manejados de manera adecuada y responsable [3].

**2.1.1.4 Uso del plástico en el concreto.** El uso del plástico en la construcción de concreto es una alternativa innovadora y respetuosa con el medio ambiente, gracias a sus características de bajo costo y alta resistencia. Esta alternativa tiene el potencial de reducir el efecto adverso de la generación de desperdicios y sustancias contaminantes durante los procesos de construcción de una estructura, al tiempo que puede mejorar la durabilidad y sostenibilidad a lo largo de su ciclo de vida. Es importante señalar que, a pesar de la amplia utilización de la mampostería en bloques de ladrillo en el ámbito constructivo, se han realizado esfuerzos para explorar nuevas alternativas, como el uso del PET, con el objetivo de mejorar las reacciones del concreto y encontrar soluciones más sostenibles en la construcción de edificaciones [4].

**2.1.1.5 Eficiencia de los ensayos de plástico en elementos estructurales.** En los procesos constructivos, es crucial evaluar la eficiencia de los materiales y los costos asociados con su uso. En este sentido, el plástico como material innovador es una alternativa que debe ser evaluada cuidadosamente para determinar su costo y compararlo con los materiales tradicionales como el concreto. Según Neumann, la necesidad de encontrar materiales más económicos y resistentes que la madera, así como la necesidad de proteger los bosques, llevó al mercado una serie de sistemas de encofrados hechos de diferentes materiales como metal, plástico, fibra, etc., que han ido reemplazando gradualmente a los encofrados de madera. Además, la rapidez en la construcción es un factor importante debido a las demandas comerciales y técnicas actuales, lo que ha aumentado la importancia de la

velocidad en la construcción. Por lo tanto, el uso de encofrados de plástico puede contribuir a aumentar la velocidad de construcción de elementos verticales y hacer que el proceso de hormigonado sea más eficiente [5].

**2.1.1.6 Análisis del comportamiento de un elemento estructural mediante el plástico reciclado.** En los años recientes, se ha observado un incremento en el entusiasmo por descubrir opciones de materiales alternativos destinados a la edificación, en reacción a la creciente solicitud de recursos naturales y la urgencia de mitigar el impacto ecológico de la industria de la construcción. Es en este contexto que surge el interés por integrar el plástico reciclado como un material alternativo en la construcción.

La normativa para la construcción de edificaciones establece que cualquier material alternativo debe ser sometido a ensayos técnicos para evaluar su viabilidad en términos de su resistencia y durabilidad. En el caso del plástico reciclado, se plantea la necesidad de realizar ensayos técnicos a flexión de una viga de concreto, aprovechando las características del concreto y del plástico para integrarlos en los sistemas constructivos actuales.

Según Gaggino, La industria del polietileno tereftalato (PET) proporciona pruebas de que el empleo de PET reciclado como material de construcción es factible, y señala la existencia de empresas o instalaciones de reciclaje que comercializan este material reciclado de PET. En consecuencia, resulta crucial llevar a cabo una evaluación sobre cómo se comporta el concreto al mezclarse con PET reciclado, con el fin de determinar si es viable utilizarlo como un material de construcción. [6].

Para ello, se emplea la norma NSR-10, Esta normativa establece los criterios técnicos necesarios que los materiales de construcción deben cumplir para asegurar su adecuación en la edificación de estructuras. Este proceso de evaluación abarca la caracterización exhaustiva

de los materiales, junto con la evaluación de su capacidad para soportar cargas estructurales, incluyendo la resistencia a la compresión y tracción del concreto y del PET reciclado en condiciones similares a las que experimentarían en una construcción real. En resumen, el análisis del PET reciclado como una alternativa de material en la construcción implica la realización de pruebas técnicas en una viga de concreto sometida a flexión, así como la evaluación de la resistencia a compresión y tensión tanto del concreto como del PET reciclado, siguiendo las pautas de la normativa NSR-10. De esta forma, se persigue determinar la viabilidad de utilizar el PET reciclado como un recurso alternativo en la construcción de edificaciones.

### ***2.1.2 Análisis del comportamiento de un elemento estructural con adición de fibras de fique***

En la búsqueda de materiales más sostenibles y seguros para su uso en la construcción, se han estudiado diversas fibras naturales. Una de las opciones más interesantes es el fique, una fibra de origen vegetal que ha sido utilizada en diferentes aplicaciones a lo largo del tiempo. En este caso, se plantea la posibilidad de emplear el fique para obtener concretos más ligeros, con una buena calidad y a bajo costo, lo que resulta muy atractivo para la industria de la construcción.

El concreto es ampliamente empleado en la construcción debido a su flexibilidad en términos de preparación y uso, así como a su robustez, especialmente en situaciones de compresión. No obstante, presenta limitaciones en cuanto a su capacidad para resistir tensiones, flexiones y cortes. Por esta razón, se ha investigado la viabilidad de incorporar fibras en el concreto con el propósito de realzar sus características mecánicas.

La inclusión de fibras, como las derivadas del fique, tiene el potencial de considerablemente elevar las características mecánicas del concreto, siempre y cuando se preste atención a la selección apropiada de la fibra y su cantidad adecuada. Según lo indica Jiménez, “la utilización de fibras puede mejorar la resistencia del concreto en diferentes aspectos” [7].

Para experimentar con la mezcla de fique y concreto, se han realizado ensayos en probetas de acuerdo con la normativa aplicable, buscando obtener resultados que permitan evaluar la viabilidad del uso de esta fibra en la construcción de elementos estructurales. En resumen, se anticipa que este análisis pueda aportar al avance de materiales en la construcción que sean tanto más amigables con el entorno como más eficaces, lo que propiciaría una disminución en la huella ecológica de esta industria y una mejora en la calidad de vida de la población.

### **2.1.3 Ensayos de resistencia del concreto**

**2.1.3.1 Ensayo a compresión.** La prueba de compresión del concreto es una técnica habitualmente empleada para valorar la fortaleza y la excelencia del concreto. En esta evaluación, se expone una muestra cilíndrica de concreto a una fuerza axial que aumenta gradualmente en una máquina de ensayos hasta que se produce su colapso debido a la compresión. El resultado obtenido de este examen es la resistencia a la compresión del concreto, que se expresa en términos de fuerza por unidad de área.

La capacidad de resistir la compresión es un elemento significativo en el proceso de planificación de estructuras de concreto y en la valoración de la solidez de estructuras ya construidas. Asimismo, esta prueba se aplica para confirmar la calidad del concreto durante

su producción, ya que facilita la identificación de potenciales imperfecciones en la mezcla o en el proceso de curado [2].

El ensayo a compresión del concreto es un procedimiento estandarizado y regido por normas internacionales, lo que permite una comparación precisa de los resultados entre diferentes laboratorios y en distintas condiciones.

**2.1.3.2 Ensayo a flexión.** El análisis de flexión del concreto es un procedimiento convencional empleado para evaluar la capacidad de resistencia y la capacidad de deformación del concreto bajo la influencia de cargas que generan flexión. En este examen, una viga de concreto se posiciona en una máquina de pruebas con dos puntos de soporte, y se aplica una carga en el centro de la viga. A medida que se ejerce esta carga, la viga se flexiona y se modifica en su forma, mientras que se registran los valores de la carga y la deformación. La curva resultante de carga-deformación se utiliza para calcular varias características, como la resistencia a la flexión, la resistencia a la tracción, la rigidez y la capacidad de deformación.

El procedimiento de flexión se emplea de manera habitual para examinar la excelencia del concreto empleado en construcciones de concreto reforzado, tales como puentes y edificaciones. Su utilidad principal radica en la evaluación de la resistencia a la flexión del concreto, un aspecto de vital importancia para garantizar la seguridad estructural y la capacidad de carga. Además, se aplica para evaluar la calidad del proceso de curado del concreto, la calidad de la mezcla y la eficacia de los aditivos utilizados [2].

La prueba de flexión del concreto sigue un procedimiento estandarizado, como se describe en la norma NSR-10. Es importante seguir rigurosamente este procedimiento para asegurar resultados adecuados y comparables. Además, se debe tener en cuenta que los

resultados del ensayo pueden verse afectados por factores como la forma de la viga, la tasa de carga y las condiciones ambientales, Por lo tanto, resulta fundamental implementar acciones destinadas a reducir estos impactos y lograr resultados de confianza.

#### **2.1.4 Ensayos para el diseño de mezcla**

**2.1.4.1 Ensayo de granulometría de agregados.** Se lleva a cabo este análisis con el fin de establecer cómo se distribuyen las partículas del agregado fino y grueso cuando atraviesan tamices. Esta distribución de tamaños se emplea para verificar si los gránulos de agregado cumplen con requisitos particulares y para proporcionar la información esencial en la supervisión de la producción de la mezcla.

Los equipos más importantes que se utilizan son los tamices según estándares de la norma ASTM E11, la balanza para controlar los pesos y un horno.

Para realizar el ensayo se deberá preparar las muestras secándolas en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C; Luego se registran los pesos iniciales de las muestras, y se pasa a los tamices y se agitan manualmente por 1 minuto, luego de esto se separará la muestra que quedo en cada tamiz y se registra su peso, para posteriormente realizar los cálculos de porcentajes de masa y curva granulométrica [8].

**2.1.4.1 Gravedad específica de agregado fino y porcentaje de absorción.** Este procedimiento implica la determinación de la gravedad específica y la absorción de los agregados finos, que se pueden expresar como gravedad específica bruta y gravedad específica aparente. La gravedad específica es la relación entre la masa del agregado y la masa de un volumen de agua que ocupa el mismo espacio que el agregado. Para llevar a cabo

esta prueba, se requieren herramientas esenciales, como un picnómetro con capacidad adecuada para la muestra, un molde en forma de cono y un pisón para evaluar la humedad superficial, una balanza, un horno y un termómetro.

El procedimiento comienza con la preparación del agua a una temperatura de  $23 \pm 2$  °C. Luego, se seca la muestra en el horno a  $110 \pm 5$  °C, seguido de la saturación de esta con agua hasta alcanzar al menos un 6% de humedad. Posteriormente, se permite que repose durante  $24 \pm 4$  horas en un recipiente hermético para evitar la pérdida de humedad. La muestra se extiende y se mezcla hasta que se acerque a la condición de saturación superficialmente seca. Luego, se llena el molde con la muestra de agregado fino, utilizando los dedos para nivelar la parte superior del molde y asegurar que esté completamente lleno.

El siguiente paso implica compactar la muestra en el molde utilizando un pisón con 25 golpes distribuidos de manera uniforme en toda la superficie. Luego, se retira el molde verticalmente, y si la humedad superficial aún está presente, el agregado fino mantendrá la forma del molde. Cuando se produce una ligera caída del agregado fino, se alcanza la condición de saturación superficialmente seca (SSS).

Continuando, la muestra se coloca en el picnómetro y se llena con agua hasta el 90% de su capacidad, se tapa y se somete a agitación en un vibrador mecánico para eliminar el aire sin causar daño a las partículas. Posteriormente, se retira del vibrador y se vacía la muestra, realizando un enjuague con agua destilada para asegurar que todas las partículas salgan del picnómetro. Luego, se toman medidas de peso y la muestra se seca en un horno a  $110 \pm 5$  °C. Finalmente, se pesa la muestra seca y se realizan los cálculos necesarios para determinar la gravedad específica y la absorción [8].

**2.1.4.2 Peso unitario de agregados finos y gruesos.** Este procedimiento tiene como objetivo determinar la masa por unidad de volumen de un material en dos estados: compacto y suelto, expresado en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ). El peso unitario en estado suelto se obtiene al llenar suavemente el recipiente con el material seco hasta que comienza a derramarse, luego se nivela. Este valor se emplea de manera constante para convertir entre peso y volumen. El peso unitario en estado compacto se logra cuando la muestra ha experimentado un proceso de compactación en el recipiente, lo que resulta en una mayor acomodación de las partículas y, por ende, un valor más alto de masa por unidad de volumen.

Los equipos necesarios para el ensayo son un molde para contener la muestra, una varilla de acero de punta hemisférica, una balanza digital y un horno.

- *Peso unitario suelo:* En un primer paso, se procede a anotar tanto el peso como el volumen del molde. Luego, se introduce el material en el molde, y una vez que está completamente lleno, se nivela la superficie utilizando una varilla. Posteriormente, se registra nuevamente el peso [9].
- *Peso unitario compacto:* En primer lugar, se toma nota del peso y el volumen del molde. Luego, el material se dispone en el molde en tres estratos, nivelándolo y compactándolo uniformemente con 25 golpes de la varilla después de cada capa. Una vez que el molde se encuentra lleno, se iguala la superficie y se vuelve a registrar el peso [9].

**2.1.4.3 Gravedad específica de agregado grueso y Absorción de humedad.** Este procedimiento tiene como objetivo evaluar la gravedad específica y la absorción de los agregados gruesos, que pueden expresarse como gravedad específica bruta y gravedad específica aparente. La gravedad específica de los agregados se define como la relación entre

la masa del agregado y la masa de un volumen de agua igual al volumen ocupado por el agregado. Para llevar a cabo esta prueba, se requieren equipos esenciales, como una canastilla de malla de alambre de tamaño adecuado para contener las muestras de diferentes dimensiones, una balanza, un termómetro y un horno.

El procedimiento comienza con la preparación de un baño de agua a una temperatura de prueba de  $23 \pm 2$  °C. A continuación, la canastilla se fija de tal manera que cuelgue de la balanza y se sumerja completamente en el agua, y se registran los pesos correspondientes. Luego, la muestra se prepara secándola en el horno y permitiendo que se enfríe. Posteriormente, la muestra se coloca en la canastilla y se sumerge en el baño de agua, y se registra su peso utilizando la balanza.

Después, se retira la muestra del agua y se seca hasta alcanzar la condición de saturación superficialmente seca (SSS). Para lograr esta condición, se envuelve la muestra en una tela y se gira para eliminar toda la película de agua externa, y luego se secan individualmente las partículas más grandes. Se registra el peso de la muestra en esta condición, y luego se coloca en el horno para secarse completamente antes de registrar nuevamente el peso. Con estos datos, se pueden realizar los cálculos necesarios para determinar la gravedad específica y la absorción de los agregados gruesos [8].

**2.1.4.4 Diseño de mezcla por norma ACI 211.** La elaboración de una mezcla de concreto requiere disponer de los resultados obtenidos en los análisis de granulometría, gravedad específica y peso unitario de los agregados. Siguiendo las pautas de esta normativa, se efectúa la elección de los componentes apropiados para la mezcla de concreto y se realiza el cálculo de las proporciones relativas para lograr una mezcla que exhiba las características adecuadas en términos de trabajabilidad, resistencia a la compresión y durabilidad.

Primero se planea el tipo de mezcla que se va a realizar, considerando su resistencia máxima ( $F_c$ ) y su edad de fraguado, junto con el cemento a utilizar, con los resultados de granulometría se considera el tamaño máximo de grava a utilizar, posteriormente se considera la relación agua/cemento necesario para producir la resistencia escogida en concreto sin aire incluido; en base a los pasos anteriores, se establece la cantidad de cemento requerida. Posteriormente, se calcula la cantidad de grava teniendo en cuenta el módulo de finura y el tamaño máximo de los fragmentos de grava, a continuación, se determina la cantidad de agregado fino que se deberá utilizar en la mezcla, para conseguir un concreto con esa resistencia en específico [10].

## 2.2 Marco conceptual

*Contaminación:* La contaminación ambiental se refiere a la presencia de elementos o sustancias perjudiciales tanto para los seres humanos como para los ecosistemas, que pueden causar daño. Existen diversas formas de contaminación [1].

*Impacto ambiental:* Involucra las diversas consecuencias que surgen en el entorno natural como resultado de la actividad humana y el estilo de vida de la humanidad. El impacto ambiental puede manifestarse de diversas maneras y tener variados efectos en el entorno natural [1].

$CO_2$ : El dióxido de carbono es un gas que carece de olor, es transparente, levemente ácido y no combustible. Puede disolverse en agua bajo condiciones de presión constante y se compone de una molécula lineal que consiste en un átomo de carbono enlazado a dos átomos de oxígeno, con la estructura  $O = C = O$  [1].

*Concreto:* Se trata de una combinación de rocas, arena, agua y cemento que, al endurecerse, forma uno de los materiales de construcción más robustos, ideal para la creación

de cimientos y paredes. Es ampliamente reconocido como el material de construcción más empleado en todo el mundo. Su composición, cuando se mide y se utiliza adecuadamente, brinda una solidez inigualable y se utiliza en la edificación y la creación de superficies resistentes. Sin embargo, una vez que se seca y se solidifica, carece de flexibilidad [11].

*PET:* El Polyethylene Terephthalate, comúnmente conocido como PET, es un tipo de plástico polimérico que se produce mediante una reacción de ácido tereftálico y monoetilenglicol. Este material se encuentra disponible en diversas formas y puede ser moldeado mediante varios procesos, incluyendo extrusión, inyección y termoformado. En la actualidad, el PET se ha convertido en uno de los termoplásticos más rígidos y robustos disponibles en el mercado, y se destaca por su transparencia y claridad, cualidades altamente valoradas [4].

*Elemento estructural:* Un componente estructural se refiere a cada una de las partes distintas, aunque interconectadas, en las que se puede descomponer una estructura con fines de diseño. El proceso de diseñar, calcular y verificar estos componentes se lleva a cabo conforme a las normativas de resistencia de los materiales, y esto es aplicable en los campos de la arquitectura, la ingeniería civil, la ingeniería mecánica y la ingeniería estructural [12].

*Viguetas:* Las viguetas son componentes de concreto armado diseñados específicamente para soportar cargas que pueden ser lineales, concentradas o uniformemente distribuidas, en una dirección única. Estas viguetas pueden desempeñar un papel principal en estructuras rígidas formadas por vigas y columnas, y también se emplean para sustentar losas, ya sean sólidas o con nervaduras [12].

*Acero de Refuerzo:* También conocido como "ferralla", este material desempeña un papel fundamental en la industria de la construcción al utilizarse para fortalecer estructuras y otras obras, siguiendo las indicaciones y detalles especificados en los planos y las

especificaciones. Dada su relevancia en los proyectos de construcción, es esencial que se haya comprobado y evaluado su calidad. Los productos de acero para refuerzo deben cumplir con ciertas normativas que establecen requisitos de resistencia, ductilidad, dimensiones y propiedades físicas o químicas de la materia prima empleada en su fabricación [12].

*Sostenibilidad:* Explica el proceso mediante el cual los sistemas biológicos aseguran su productividad a lo largo del tiempo, haciendo referencia al equilibrio que una especie mantiene con los recursos disponibles en su entorno. En un sentido más amplio, se aplica al uso de un recurso sin superar su capacidad de renovación [1].

*Resistencia:* La resistencia se refiere a la habilidad de los componentes estructurales para soportar las fuerzas a las que se ven sometidos sin sufrir daños. Su nivel de resistencia está influido por diversos factores, incluyendo el material utilizado, la forma geométrica de los elementos y el tipo de conexión entre ellos [2].

*Huella de carbono:* Se trata de una métrica que evalúa la cantidad de gases de efecto invernadero que se emiten a la atmósfera como consecuencia de las acciones humanas, tales como la fabricación de productos, la prestación de servicios, el transporte y el uso de energía, entre otras actividades [1].

*Desarrollo sostenible:* Se refiere a la acción de atender las necesidades presentes de la sociedad sin poner en riesgo la capacidad de las generaciones venideras para cubrir sus propias necesidades. Este equilibrio implica considerar los aspectos económicos, sociales y ambientales de manera armoniosa [13].

*Ciclo de vida de los materiales:* El término "ciclo de vida de los materiales" hace referencia al conjunto de fases que experimenta un material desde su obtención, fabricación, empleo hasta su eliminación. Este concepto resulta fundamental para analizar el efecto

ambiental de los materiales empleados en proyectos de construcción y para detectar posibles áreas de mejora en relación con la sostenibilidad [14].

*Reciclaje:* El reciclaje se refiere a la acción de convertir materiales previamente utilizados o descartados en nuevos productos con el propósito de disminuir la demanda de materias primas y la producción de desechos. En el contexto de esta investigación, la reutilización del PET y el Fique podría representar una opción sostenible para realzar las características del concreto [14].

*Propiedades físico-mecánicas:* Las propiedades físicas y mecánicas son las cualidades de un material que influyen en su respuesta ante diversas fuerzas o circunstancias. Estas cualidades pueden abarcar aspectos como la capacidad de soportar la compresión, la resistencia a la flexión, la densidad y la absorción de agua, entre otros. La evaluación de estas características resulta esencial para determinar la calidad y la resistencia a largo plazo del concreto [2].

*Sostenibilidad en la construcción:* La construcción sostenible hace referencia a la aplicación de métodos y enfoques que tienen como objetivo minimizar el efecto negativo de la construcción en el medio ambiente. Esto implica la mejora en la eficiencia energética de las edificaciones, el estímulo del empleo de materiales renovables y la preservación de los recursos naturales. Este principio es de gran relevancia en esta investigación, ya que la utilización de materiales alternativos de origen renovable podría ser una estrategia sostenible para realzar las propiedades del concreto y reducir su huella ambiental [14].

*Impacto ambiental de la construcción:* La construcción, en virtud de su consumo de recursos naturales, la liberación de gases de efecto invernadero, la producción de desechos y otros elementos, puede ejercer una influencia considerable sobre el entorno ecológico. La

evaluación del impacto ambiental de las actividades constructivas resulta esencial para detectar áreas de mejora y para medir la sostenibilidad de los proyectos de construcción [4].

### 2.3 Marco legal

*NSR10 de 2010:* El NSR-10, que es el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, tiene como función establecer las condiciones necesarias que deben cumplir las edificaciones para asegurar una respuesta estructural adecuada frente a sismos [15].

*Resolución 1407 de 2018:* La regulación impone la responsabilidad a las empresas de recolectar un porcentaje de los envases y embalajes que introducen en el mercado, con el propósito de incrementar la cantidad de materiales reciclados y reutilizados en el país. Esta normativa se enfoca en los residuos sólidos no peligrosos, que en su mayoría se originan en los hogares, y se dividen en categorías como los orgánicos, que constituyen aproximadamente el 61,3% del total, seguidos por los materiales metálicos (18,5%), plásticos (10,7%), cartón y papel (6,55%) y vidrio (2,4%) [16].

*Ley 1259 de 2008:* Esta legislación define regulaciones relacionadas con la clasificación inicial de los desechos sólidos en su lugar de origen y la utilización de estos recursos en todo el territorio de Colombia [17].

*Ley 1819 de 2016:* Esta normativa introduce un gravamen nacional sobre las emisiones de carbono con el propósito de disminuir las liberaciones de gases de efecto invernadero en Colombia [18].

*Ley 1333 de 2009:* Este conjunto de regulaciones establece pautas para evitar y gestionar la contaminación ambiental, abarcando acciones relacionadas con la administración de desechos tanto peligrosos como no peligrosos [19].

*Norma ACI 211:* Esta normativa es emitida por el Instituto Americano del Concreto (ACI) y brinda recomendaciones y directrices para la selección de proporciones adecuadas de ingredientes al preparar concreto en proyectos de construcción. En este estándar se establecen y detallan dos enfoques para determinar las proporciones necesarias en el concreto convencional [20].

*Norma NTC 2871:* Esta normativa se utiliza para evaluar la capacidad de flexión del concreto [21].

*Norma NTC 673:* Esta normativa se utiliza para calcular la resistencia a la compresión del concreto a través de muestras cilíndricas [22].

## **2.4 Marco de Antecedentes**

Herrera, R. S., & González, G. O. (2019). Integración de PET reciclado a flexión en un elemento constructivo de concreto. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (6), 99-117. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (iteso). Se plantea una investigación sobre la incorporación de PET reciclado en un elemento constructivo diseñado para autoconstrucción, con el propósito de evaluar la posibilidad de emplear PET como material de construcción. Este estudio se realiza siguiendo las normas para la evaluación de flexión en una viga de concreto [4].

Campana Salas, J., & Flores Sovero, R. M. (2020). Comportamiento de los plásticos reciclados PET en la resistencia a compresión y flexión del concreto  $f_c 210$ , Lima, 2019. Universidad Cesar Vallejo. Este estudio se llevó a cabo con la finalidad de examinar cómo el reemplazo de parte del agregado fino en el concreto, específicamente en proporciones del 3%, 5% y 7%, con plástico reciclado PET, influye en las propiedades de resistencia a la compresión y flexión del concreto con una resistencia nominal de 210 MPa. Posteriormente,

se realizó una comparación entre dos grupos: uno compuesto por concreto estándar sin la adición de plástico reciclado y otro con diferentes porcentajes de plástico reciclado. Este estudio se llevó a cabo en Lima en 2019 [2].

Cabarcas Caipa, L. M., & Colpas Macias, J. D. (2020). Evaluación de la resistencia a la flexión y compresión de un concreto estructural ecológico con fibras pet propuesto conforme a la norma NSR-10 (Bachelor's thesis, Corporación Universidad de la Costa). El objetivo de esta investigación fue evaluar la posibilidad de emplear el tereftalato de polietileno (PET) proveniente de envases de plástico como un componente de refuerzo en las mezclas de concreto utilizadas en proyectos de construcción. El propósito de esta iniciativa era doble: por un lado, contribuir al cuidado del medio ambiente mediante el reciclaje de PET, y por otro, asegurarse de que esta adición no afectara negativamente la calidad de las estructuras construidas [12].

Cueva Peña, R. y Palacios Pulache, L. (2020). Diseño de concreto para elementos no estructurales utilizando fibras de plástico PET, en la ciudad de Piura. Universidad Cesar Vallejo. El objetivo principal de este proyecto de investigación fue evaluar el impacto de la incorporación de fibras de plástico PET en la formulación de concreto destinado a elementos no estructurales en la ciudad de Piura. El enfoque de investigación adoptado fue de carácter experimental, ya que involucró la manipulación de fibras de plástico PET (variable independiente) con el propósito de diseñar un concreto específico para elementos no estructurales (variable dependiente). Este proyecto se clasifica como investigación aplicada, ya que busca abordar un problema de carácter socioambiental. La muestra consistió en un total de 20 probetas cilíndricas para ensayos de compresión, 12 para ensayos de tracción y 16 vigas prismáticas para ensayos de flexión [13].

Joaqui, J. A., y Montes, C. C. (2020). Comportamiento mecánico a la flexión y compresión del concreto reforzado con fibra de fique en vigas y cilindros. El objetivo central de la investigación presentada en este documento es evaluar las propiedades mecánicas de diferentes elementos de concreto, a saber, losas, cilindros y vigas, que han sido confeccionados utilizando una combinación de concreto y fibras de fique. En particular, en el caso de las losas, se busca determinar la disposición óptima de las fibras de fique en la malla de refuerzo, con el propósito de mejorar las propiedades mecánicas del concreto, cumpliendo al mismo tiempo con los requisitos establecidos en las normativas colombianas de construcción sismo resistente [11].

### **3. Metodología**

#### **3.1 Metodología**

Esta investigación es de tipo experimental y cuantitativa. Se clasifica como experimental debido a su enfoque en la exploración y análisis de datos específicos que no han sido previamente investigados, particularmente en relación con la incorporación de un elemento estructural poco convencional. El propósito principal es establecer un punto de partida para futuras investigaciones más detalladas en este campo. Aunque presenta similitudes con un diseño cuasiexperimental, ya que implica la manipulación activa de una variable independiente, el enfoque central de este proyecto se basa en experimentar con un elemento estructural prefabricado utilizando concreto que contiene PET reciclado y fibras de fique, siguiendo un plan de fases definidas. Además, se caracteriza como cuantitativo debido a la utilización de métodos matemáticos para analizar y presentar una amplia cantidad de datos derivados de la experimentación.

La metodología de este proyecto se podría dividir en 7 etapas generales, las cuales son agrupaciones de actividades que se deberán realizar para completar el proyecto de investigación.

### ***3.1.1 Fase de búsqueda de información (FASE 1)***

Esta etapa consiste en la búsqueda y recolección de información pertinente para el tema a analizar, lo cual es fundamental para tener un conocimiento previo sobre los diferentes materiales alternativos que pueden ser de uso constructivo en una edificación.

### ***3.1.2 Fase de búsqueda de materiales (FASE 2)***

Se realizará la elección y obtención de diversos materiales necesarios para crear las muestras de concreto. Esto implica la adquisición de agregado grueso (grava), cemento, agregado fino (arena), tereftalato de polietileno (PET) reciclado y fibra de furcraea andina (Fique). Estos elementos son esenciales para llevar a cabo los ensayos planificados.

### ***3.1.3 Fase de ensayos de caracterización de materiales (FASE 3)***

Con el fin de tener una caracterización de los materiales mediante la norma ACI 211 se realizarán los ensayos y posteriormente desarrollar un análisis respecto a los resultados obtenidos para su utilización en el diseño de mezcla.

### ***3.1.4 Diseño de mezcla (FASE 4)***

En esta fase, se procederá a la formulación del diseño de mezcla de concreto con una resistencia objetivo de 3000 psi, utilizando los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de materiales y siguiendo el método ACI 211. Este proceso implicará la

creación de dos tipos de mezclas. El primero corresponde a una mezcla de concreto convencional, mientras que el segundo será un diseño de mezcla que incorpora tereftalato de polietileno (PET) reciclado y fibra de furcraea andina (Fique). Por consiguiente, en la tabla 2,3 y 4 se podrá observar los diferentes números de vigas y cilindros con su respectiva edad donde se determinó un tiempo de curado de 7, 14 y 28 días.

**Tabla 1.** *Tipo de mezcla, numero de cilindro y vigas*

| Tipo de mezcla         | N° de cilindros | N° de vigas |
|------------------------|-----------------|-------------|
| Concreto Convencional  | 9               | 6           |
| Concreto + PET + Fique | 9               | 6           |

**Tabla 2.** *Números de cilindros con respecto al tiempo de curado*

| Tipo de cilindros      | 7 días | 14 días | 28 días | Total |
|------------------------|--------|---------|---------|-------|
| Convencionales         | 3      | 3       | 3       | 9     |
| Concreto + PET + Fique | 3      | 3       | 3       | 9     |
| Total                  |        |         |         | 18    |

**Tabla 3.** *Números de vigas con respecto al tiempo de curado.*

| Tipo de vigas          | 7 días | 28 días | Total |
|------------------------|--------|---------|-------|
| Convencionales         | 3      | 3       | 6     |
| Concreto + PET + Fique | 3      | 3       | 6     |
| Total                  |        |         | 12    |

### 3.1.5 Fase de ensayos (Vigas y cilindros) (FASE 5)

Una vez fundido el concreto en cada una de las probetas, se ensayaron las vigas y los cilindros una vez terminado el proceso de curado para cada probeta dentro del cual se tuvo un proceso de curado de 7,14 y 28 días tanto para vigas como cilindros. Los ensayos que se van a desarrollar serán mencionados en la tabla 5.

**Tabla 4.** *Ensayos de laboratorio (Vigas – Cilindros)*

| Ensayos                                                               | Norma      |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| Ensayo para determinar la resistencia del concreto a flexión en vigas | NTC - 2871 |
| Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros de concreto        | NTC – 673  |

### 3.1.6 Fase de Interpretación de resultados (FASE 6)

En esta etapa se analizarán y compararán los resultados obtenidos en la fase anterior, lo cual permitirá comprobar la hipótesis del proyecto y evaluar los posibles beneficios de la utilización de los materiales renovables en la construcción.

### 3.1.7 Fase del informe (FASE 7)

En esta etapa se elaborará un documento escrito que recoja los resultados y conclusiones de la investigación, lo cual es fundamental para la difusión y divulgación de los hallazgos y aportes del proyecto.

## 3.2 Desarrollo metodológico

**Tabla 5.** *Desarrollo metodológico del proyecto*

| Objetivo Especifico                                                                      | Fase                                | Actividad                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Determinar la resistencia a flexión mediante la proporción de 1.5% de fique y 3% de PET. | Fase 2. Búsqueda de materiales.     | Planificación y definición de materiales a emplear para la elaboración de la mezcla de concreto.       |
|                                                                                          |                                     | Cotizaciones de materiales en diferentes puntos de venta.                                              |
|                                                                                          |                                     | Búsqueda y obtención de materiales para la fabricación.                                                |
|                                                                                          | Fase 3. Caracterización de material | Se agitan los tamices y se estima el porcentaje de agregado grueso que queda retenido en cada tamiz.   |
|                                                                                          |                                     | Se coloca el agua en la bandeja y posteriormente la grava y se registra cuanto se sumerge con el agua. |
|                                                                                          |                                     | Se limpia, seca y pesa el picnómetro y se registra su masa.                                            |
|                                                                                          |                                     | Se llena el picnómetro con agua desairada.                                                             |
|                                                                                          |                                     | El agua es desairada con la bomba de vacío.                                                            |
|                                                                                          |                                     | Se registra su masa y se pone al horno y posteriormente se registra la misma.                          |
|                                                                                          |                                     | El fique se deja 24 h en agua.                                                                         |

| Objetivo Especifico                                                                                                                           | Fase                                  | Actividad                                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Realizar una comparativa de las propiedades mecánicas del concreto a partir de la adición de fique y PET con un concreto convencional.        | Fase 4. Diseño de mezcla              | Se peso el material a utilizar.                                                                                                  |
|                                                                                                                                               |                                       | Se coloco cada material en la mezcladora (Trompo).                                                                               |
|                                                                                                                                               |                                       | Se fundieron las probetas (Vigas – Cilindros).                                                                                   |
|                                                                                                                                               | Fase 5. Ensayos (Vigas y cilindros)   | Se tomaron los datos de los cilindros (peso, diámetro, altura).                                                                  |
|                                                                                                                                               |                                       | Se tomaron los datos de las vigas (peso, área, altura, profundidad).                                                             |
|                                                                                                                                               |                                       |                                                                                                                                  |
| Evaluar el impacto económico de la incorporación de fibra de fique y PET reciclado, analizando la relación costo-beneficio de los materiales. | Fase 6. Interpretación de resultados. | Obtención de datos de laboratorio.                                                                                               |
|                                                                                                                                               |                                       | Verificación de datos mediante los ensayos de laboratorio.                                                                       |
|                                                                                                                                               |                                       | Organización de los datos obtenidos en los ensayos de flexión (vigas) y compresión (cilindros).                                  |
|                                                                                                                                               | Fase 6. Interpretación de resultados. | Determinar los gastos de los diferentes materiales para la elaboración del concreto convencional como el concreto con agregados. |
|                                                                                                                                               |                                       | Considerar los costos que tiene la fabricación de estos elementos (Vigas - Cilindros).                                           |
|                                                                                                                                               |                                       | Distribuir los costos y beneficios que se requieren mediante el tiempo.                                                          |

## 4. Materiales

### 4.1 Selección de materiales

Se trabajará para una dosificación de 1:2:4 con una resistencia de 3000 Psi. Para la selección de los materiales se tuvieron en cuenta cemento, arena, grava y agregados como tereftalato de polietileno (PET) reciclado y furcraea andina (Fique) para la elaboración del concreto, puesto que los materiales inicialmente mencionados fueron suministrados por la universidad Santo Tomas de Bucaramanga y por otra parte el tereftalato de polietileno (PET)

reciclado se compró a una empresa en Cúcuta recolectora y trituradora de botellas PET, y así mismo el furcraea andina (Fique) se compró a través de una empresa en Bogotá la cual se dedica a comercializar furcraea andina (Fique). Los materiales seleccionados se encontrarán mencionados en la tabla 7.

**Tabla 6.** *Materiales del proyecto*

| <b>Materiales</b>                   | <b>Origen</b>                                                                 | <b>Observaciones</b>                                  |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Tereftalato de polietileno (PET)    | Envases plásticos reciclados                                                  | Trituradas en hojuelas por empresa Cucuteña           |
| Furcraea andina (Fique),<br>Cemento | Planta natural de fique (Cono de cabuya de fique)<br>Holcim                   | Cortadas en tiras manualmente<br>Descripción de 25 kg |
| Agregado Grueso (Grava)             | Suministrado por la Universidad Santo Tomas de Bucaramanga campus Piedecuesta | Diferentes tipos de tamaño del agregado               |
| Agregado Fino (Arena)               | Suministrado por la Universidad Santo Tomas de Bucaramanga campus Piedecuesta | Lecho de rio                                          |

## 4.2 Descripción de materiales

Después de la elección de los materiales, se procederá a proporcionar una concisa descripción de las propiedades y atributos de estos elementos, que serán fundamentales en la preparación de la mezcla.

### 4.2.1 Agregado grueso (Grava)

Este agregado está comprendido por un tamaño que oscila entre los 2 y 64 mm y por consiguiente es producto de una serie de divisiones de otras rocas y minerales; el agregado fue suministrado por la universidad Santo Tomas de Bucaramanga, dentro del cual en la tabla 8 se pueden observar algunas de sus características.

**Figura 1.** *Agregado grueso (grava)***Tabla 7.** *Características del agregado grueso (Grava)*

| Ítems                       | Descripción                                               |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Origen                      | Lecho de ríos                                             |
| Suministrado                | Universidad Santo Tomas de Bucaramanga campus Piedecuesta |
| Tamaño                      | 4,76 mm a 25,40 mm                                        |
| % Absorción                 | 0,945                                                     |
| Gravedad especifica         | 2,711                                                     |
| Color líquido que sobrenada | 2                                                         |
| Aspecto                     | Seca y limpia                                             |
| Presentación                | Saco de 50 kg                                             |

#### 4.2.2 Agregado fino (Arena)

El agregado fino es uno de los agregados más utilizados en la construcción y su principal uso es en la elaboración de morteros, concreto estructural, frisos, este material se acumula (banco de arena) en gran medida en el lecho de los ríos donde es extraídos comúnmente para diversos usos. La arena fue suministrada por la universidad Santo Tomas de Bucaramanga, dentro del cual en la tabla 9 se pueden observar algunas de sus características.

**Figura 2.** *Agregado fino (Arena)***Tabla 8.** *Características del agregado fino (Arena)*

| Ítems                | Descripción                                               |
|----------------------|-----------------------------------------------------------|
| Origen               | Lecho de ríos                                             |
| Suministrado         | Universidad Santo Tomas de Bucaramanga campus Piedecuesta |
| %Absorción           | 0,806                                                     |
| Gravedad específica  | 31,00                                                     |
| Tamaño               | 0,15 mm a 4,76 mm                                         |
| Condición de humedad | Poca humedad                                              |
| Presentación         | Saco de 40 kg                                             |

#### 4.2.3 *Cemento Portland tipo 1*

Este material es crucial en el área de la construcción ya que cumple un papel muy importante ya sea para la elaboración de concretos, morteros, concreto estructural, friso, sellos, aceras, mampostería, losas, donde también se opta debido a que genera los mejores tiempos de fraguado, lo cual permite un manejo adecuado en su implementación sin que presente alguna pérdida de manejabilidad. Se utilizó un cemento hidráulico de marca “Holcim” donde en la tabla 10 se pueden presentar algunas de sus características, para la preparación de la mezcla de concreto convencional y la de concreto con agregados (tereftalato de polietileno (PET) reciclado y furcraea andina (Fique)).

**Tabla 9.** *Características del cemento portland tipo 1*

| Ítems                                |     |
|--------------------------------------|-----|
| Resistencia a compresión 1 día (Mpa) | >11 |

|                                             |            |
|---------------------------------------------|------------|
| Resistencia a compresión 3 día (Mpa)        | >22        |
| Resistencia a compresión 28 día (Mpa)       | >42        |
| Tiempo de fraguado inicial (min)            | >90 y <240 |
| Cambio de longitud por autoclave (%)        | <0.80      |
| Contenido de aire en volumen de mortero (%) | <12        |
| Expansión de barra de mortero 14 días (%)   | <0.02      |
| Calor de hidratación a 3 días (kJ/kg)       | <335       |
| Expansión por sulfatos a 1 año (%)          | <0.10      |

Adaptado de industrial eco art (2022) p.2.

**Figura 3.** *Cemento Portlan*



Adaptado de web Holcim (2023).

#### 4.2.4 Tereftalato de polietileno (PET) reciclado

Este material se ha venido implementando en la construcción con el fin de reemplazar otros agregados que no son amigables con el medio ambiente y que generan una alta contaminación y a su vez cuenta con propiedades y características importantes que pueden ayudar en los diferentes en los diferentes procesos de elaboración de un proceso constructivo; en este contexto, exhibe un desempeño favorable en lo que respecta a cargas sostenidas, muestra una notable fortaleza frente al desgaste y exhibe un coeficiente de fricción muy satisfactorio. El Tereftalato de polietileno (PET) reciclado fue suministrado por una compra que se le realizó a una empresa en la ciudad de Cúcuta, en la cual los envases y botellas

plásticas son triturados y comercializados a cualquier ciudad del país. En la tabla 11 se describirán algunas de las características más importantes de este material.

**Figura 4.** Tereftalato de polietileno (PET) reciclado



**Tabla 10.** Características del Tereftalato de polietileno (PET)

| Ítems                  | Descripción                              |
|------------------------|------------------------------------------|
| Origen                 | Envases plásticos                        |
| Suministrado           | Empresa cucuteña comercializadora de PET |
| Color                  | Transparente y cristalino                |
| Tamaño                 | Diferentes tipos de tamaño               |
| Aspecto                | Plástico cristalino                      |
| % Absorción en 24 hr   | 0,5                                      |
| Absorción a la humedad | Muy mala                                 |

#### 4.2.5 *Furcraea andina* (Fique)

El *furcraea andina* (fique) es una planta es conocida y producida principalmente en Colombia y Venezuela, en la cual son consideradas plantas de un gran tamaño donde cuentas con un ancho en cada una sus hojas de aproximadamente 100 y 200 mm, estas hojas de fique están constituidas por una serie de filamentos que se encargan de formar unas fibras pequeñas que se encuentran unidas por una goma, donde es de ahí donde sale cada una de las cabuyas de fique. Esta fibra es considerada en Colombia como una de las más importantes hoy en día después del algodón. Este material fue suministrado por una compra que se le realizo a una

empresa en la ciudad de Bogotá, donde esta se encarga de comercializar cabuya y cono de fique. Este material fue comprado en cono de cabuya, por lo cual fue cortado manualmente en tiras más pequeñas. En la tabla 12 se mencionarán algunas de las características de esta fibra.

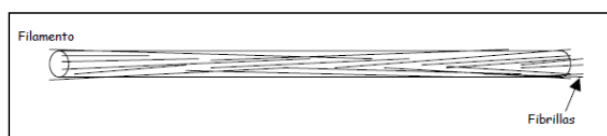
**Figura 5.** *Furcraea andina* (Fique)



**Tabla 11.** *Características generales del Furcraea andina (Fique)*

| Ítems                  | Descripción                                |
|------------------------|--------------------------------------------|
| Origen                 | Hojas de fique                             |
| Suministrado           | Empresa bogotana comercializadora de fique |
| Color                  | Habano                                     |
| Brillo                 | Opaco                                      |
| % Absorción en 24 hr   | 62,69                                      |
| Absorción a la humedad | Buena                                      |

**Figura 6.** *Tintura del fique con colorantes naturales.*



Adaptado de Ecofibras Ltda (2022).

**Figura 7.** *Tiras recortadas de fique, tamaño 3 cm***Tabla 12.** *Propiedades mecánicas de furcraea andina (Fique)*

| Propiedad                                  | Promedio | Mínimo | Máximo |
|--------------------------------------------|----------|--------|--------|
| Resistencia a la tensión (Mpa)             | 305.15   | 200.00 | 625.20 |
| Módulo de elasticidad (GPa)                | 7.52     | 5.50   | 25.50  |
| Porcentaje de elongación a la fractura (%) | 4.96     | 3.20   | 5.70   |

Adaptado de El fique, su taxonomía, cultivo y tecnología, Colina (Pérez, Jorge. 2022).

## 5. Mezcla de concreto

### 5.1 Herramientas y equipos

Antes de comenzar a preparar los dos tipos de mezcla, se llevó a cabo una petición tanto a la Universidad Santo Tomas de Bucaramanga como a el laboratorio de ingeniería civil de la Universidad en el campus Piedecuesta las herramientas y equipos pertinentes para el desarrollo de la práctica, en la cual esta fue aceptada y fue suministrado cada una de las herramientas y equipos idóneos para la elaboración de la mezcla y por consiguiente la realización de los ensayos a flexión y compresión de las maquinas correspondientes. Dentro del cual en la siguiente tabla 14 y 15 se especificará de una mejor manera.

**Tabla 13.** *Herramientas y equipos para la elaboración de concreto*

| <b>Herramientas</b> | <b>Equipos</b>      |
|---------------------|---------------------|
| Balanza             | Mezcladora (Trompo) |
| Palustre            |                     |
| Metro               |                     |
| Espátula            |                     |
| Pala                |                     |
| Carretilla          |                     |
| Varilla de acero    |                     |
| Martillo de goma    |                     |
| Baldes              |                     |
| Cono de abrams      |                     |
| Palustre            |                     |

**Tabla 14.** *Equipos para ensayos de compresión y flexión*

| <b>Probetas para ensayo</b> |                                                 |                                         |
|-----------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                             | <i>Molde metálico para cilindro de concreto</i> | <i>Préstamo laboratorio Universidad</i> |
|                             | <i>Molde metálico para vigueta de concreto</i>  | <i>Préstamo laboratorio Universidad</i> |
| <b>Equipos</b>              | <i>Máquina para ensayos a compresión</i>        | <i>Préstamo laboratorio Universidad</i> |
|                             | <i>Máquina para ensayos a flexión</i>           | <i>Préstamo laboratorio Universidad</i> |
|                             | <i>Asistente de laboratorio</i>                 |                                         |

## 5.2 Ensayos de materiales

Para calcular la dosificación de concreto se realizó una serie de ensayos previamente estipulados en la norma ACI 211 para la elaboración de la mezcla de concreto.

### 5.2.1 Ensayo de granulometría de agregados

Se llevó a cabo el ensayo de granulometría en las muestras de agregados finos y gruesos, lo que permitió calcular el módulo de finura, que resultó en un valor de 4,72, y

determinar el tamaño nominal máximo de 1". Estos datos son fundamentales para llevar a cabo el diseño de la mezcla.

**Tabla 15.** *Resultados de ensayo de granulometría de los agregados finos y gruesos*

| <b>GRADACIÓN DE AGREGADOS</b> |                   |                  |                    |                   |               |
|-------------------------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|---------------|
| <b>MATERIAL FINO</b>          |                   |                  |                    |                   |               |
| <b>Peso inicial:</b>          | <b>2.921,00</b>   | <b>gr</b>        | <b>Peso final:</b> | <b>2.914,00</b>   | <b>gr</b>     |
| <b>Tamiz (plg)</b>            | <b>Tamiz (mm)</b> | <b>Peso (gr)</b> | <b>% Reten.</b>    | <b>% Ret.Acum</b> | <b>% Pasa</b> |
| <b>4</b>                      | 4,76              | 83,0             | 2,8%               | 2,8%              | 97,2%         |
| <b>8</b>                      | 2,38              | 257,5            | 8,8%               | 11,7%             | 88,3%         |
| <b>16</b>                     | 1,19              | 1.639,2          | 56,1%              | 67,8%             | 32,2%         |
| <b>30</b>                     | 0,59              | 702,3            | 24,0%              | 91,8%             | 8,2%          |
| <b>50</b>                     | 0,30              | 193,0            | 6,6%               | 98,4%             | 1,6%          |
| <b>100</b>                    | 0,15              | 34,5             | 1,2%               | 99,6%             | 0,4%          |
| <b>200</b>                    | 0,0               | 4,5              | 0,2%               | 99,8%             | 0,2%          |
| <b>Total</b>                  |                   | 2.914            | 99,8%              |                   |               |
|                               | MODULO DE FINURA  |                  | 4,719              |                   |               |
| <b>MATERIAL GRUESO</b>        |                   |                  |                    |                   |               |
| <b>Peso inicial:</b>          | <b>1.507,00</b>   | <b>gr</b>        | <b>Peso 15 %:</b>  | <b>1.506,00</b>   | <b>gr</b>     |
| <b>Tamiz (plg)</b>            | <b>Tamiz (mm)</b> | <b>Peso (gr)</b> | <b>% Reten.</b>    | <b>% Ret.Acum</b> | <b>% Pasa</b> |
| <b>1 ½"</b>                   | 38,10             |                  |                    |                   | 100,0%        |
| <b>1"</b>                     | 25,40             | 15,0             | 1,0%               | 1,0%              | 99,0%         |
| <b>¾"</b>                     | 19,00             | 630,0            | 41,8%              | 42,8%             | 57,2%         |
| <b>½"</b>                     | 12,70             | 758,0            | 50,3%              | 93,1%             | 6,9%          |
| <b>⅜"</b>                     | 9,51              | 95,0             | 6,3%               | 99,4%             | 0,6%          |
| <b>4</b>                      | 4,76              | 9,0              | 0,6%               | 100,0%            | 0,0%          |
| <b>Total</b>                  |                   | 1.507,0          | 100,0%             |                   |               |
| TAMAÑO MAXIMO NOMINAL         | 1"                |                  | TAMAÑO MAXIMO      |                   | 3,36          |

### 5.2.2 Gravedad específica de agregado fino y Absorción de humedad

Se efectuó el ensayo de gravedad específica en el agregado fino, lo que proporcionó datos esenciales para el diseño de la mezcla. Los resultados revelaron que la gravedad

específica aparente fue de 31 y la gravedad específica bruta fue de 25. Además, se registró un porcentaje de absorción del 0,81%.

**Tabla 16.** *Gravedades específicas de agregado fino*

| GRAVEDADES ESPECÍFICAS DE AGREGADO FINO |                                                  |                           |        |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------|--------|
| A                                       | Peso del frasco + agua hasta la marca en el aire |                           | 3770   |
| B                                       | Peso de la muestra en condición SSS en el aire   |                           | 250    |
| C                                       | Peso muestra + frasco + agua hasta la marca      |                           | 4010   |
| WT                                      | Peso de la tara                                  |                           | 273    |
| D + WT                                  | Peso de la muestra + tara                        |                           | 521    |
| D                                       | Peso de la muestra secada al horno               |                           | 248    |
| Gravedad específica aparente            | 31,000                                           | Gravedad específica bruta | 24,800 |
| Gravedad específica bruta SSS           | 25,000                                           | % ABSORCION               | 0,806  |

### 5.2.3 *Peso unitario de agregado fino*

Realizando este ensayo de peso unitario se obtuvieron estos datos claves para la realización del diseño de mezcla, para el agregado fino se obtuvo el peso unitario compacto de 1604.7 Kg/m<sup>3</sup> y el peso unitario suelto de 1496.4 Kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 17.** *Pesos unitarios de agregado fino*

| PESOS UNITARIOS DE AGREGADO FINO            |                                   |         |
|---------------------------------------------|-----------------------------------|---------|
| CALIBRACIÓN DEL MEDIDOR                     |                                   |         |
| VOLUMEN DEL MEDIDOR 2086,77 cm <sup>3</sup> |                                   |         |
| Pc' 1                                       | Peso 1 material SSS compactado    | 3349    |
| Pc'2                                        | Peso 2 material SSS compactado    | 3346    |
| Pc'3                                        | Peso 3 material SSS compactado    | 3351    |
| Pc                                          | Peso prom material SSS compactado | 3348,67 |
| Ps'1                                        | Peso 1 material SSS suelto        | 3122    |

|                                           |                               |               |
|-------------------------------------------|-------------------------------|---------------|
| <b>Ps'2</b>                               | Peso 2 material SSS suelto    | <b>3126</b>   |
| <b>Ps'3</b>                               | Peso 3 material SSS suelto    | <b>3120</b>   |
| <b>Ps</b>                                 | Peso prom material SSS suelto | <b>3122,7</b> |
| Peso unitario del agregado SSS compactado | 1604,71                       | Kg/m3         |
| Peso unitario del agregado SSS suelto     | 1496,41                       | Kg/m3         |

#### 5.2.4 Gravedad específica de agregado grueso y Absorción de humedad

Se llevó a cabo el ensayo de gravedad específica en el agregado grueso, lo que proporcionó datos esenciales para el diseño de la mezcla. Los resultados indicaron que la gravedad específica aparente fue de 2.7, mientras que la gravedad específica bruta fue de 2.67. Además, se registró un porcentaje de absorción del 0,945%.

**Tabla 18.** Gravedades específicas de agregado grueso

| GRAVEDADES ESPECÍFICAS DE AGREGADO GRUESO |                                                 |                           |       |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------|-------|
| <b>A</b>                                  | Peso de la muestra en condición SSS en el aire  | <b>4701</b>               |       |
| <b>Pa</b>                                 | Peso de la canasta sumergida en agua            | <b>698</b>                |       |
| <b>Pb</b>                                 | Peso de canasta + muestra SSS sumergida en agua | <b>3637</b>               |       |
| <b>B</b>                                  | Peso de la muestra en agua                      | <b>2939</b>               |       |
| <b>C+wt</b>                               | Peso de la muestra seca + tara                  | <b>5122</b>               |       |
| <b>wt</b>                                 | Peso de la tara                                 | <b>465</b>                |       |
| <b>C</b>                                  | Peso de la muestra                              | <b>4657</b>               |       |
| Gravedad específica aparente              | 2,711                                           | Gravedad específica bruta | 2,643 |
| Gravedad específica bruta SSS             | 2,668                                           | % ABSORCION               | 0,945 |

### 5.2.5 *Peso unitario de agregado grueso*

Realizando este ensayo de peso unitario se obtuvieron estos datos claves para la realización del diseño de mezcla, para el agregado fino se obtuvo el peso unitario compacto de 1514.78 Kg/m<sup>3</sup> y el peso unitario suelto de 1438.43 Kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 19.** *Pesos unitarios de agregado grueso*

| <b>Pesos unitarios de agregado grueso</b> |                                   |                               |
|-------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| <b>Calibración del medidor</b>            |                                   |                               |
|                                           | <b>Volumen del medidor</b>        | <b>2086,77 cm<sup>3</sup></b> |
| <b>Pc' 1</b>                              | Peso 1 material SSS compactado    | <b>3175</b>                   |
| <b>Pc'2</b>                               | Peso 2 material SSS compactado    | <b>3162</b>                   |
| <b>Pc'3</b>                               | Peso 3 material SSS compactado    | <b>3146</b>                   |
| <b>Pc</b>                                 | Peso prom material SSS compactado | <b>3161,00</b>                |
| <b>Ps'1</b>                               | Peso 1 material SSS suelto        | <b>3009</b>                   |
| <b>Ps'2</b>                               | Peso 2 material SSS suelto        | <b>2991</b>                   |
| <b>Ps'3</b>                               | Peso 3 material SSS suelto        | <b>3005</b>                   |
| <b>Ps</b>                                 | Peso prom material SSS suelto     | <b>3001,67</b>                |
| Peso unitario del agregado SSS compactado |                                   | 1514,78 Kg/m <sup>3</sup>     |
| Peso unitario del agregado SSS suelto     |                                   | 1438,43 Kg/m <sup>3</sup>     |

### 5.3 **Diseño de mezcla según la norma ACI 211**

Se planeo determinar la dosificación de 1:2:4 con una resistencia de 3000 Psi, para lo cual se realizó el diseño de mezcla siguiendo la guía de la norma ACI 211; de esta forma se determinó la dosificación presentada en la tabla 21; para esto se consideró la relación agua/cemento de 0,58 según los requisitos aproximados presentes en la norma, además de considerar un asentamiento de 55,8 mm, el tamaño máximo nominal de 25.4 mm, un posible revestimiento de 5 cm y 5% de desperdicio respecto al volumen de la mezcla.

Con lo anterior, se consigue establecer que, para un tamaño máximo nominal de 25 mm y un revestimiento de 5 cm, se deberá usar 179 kg de agua en la mezcla; luego considerando la relación agua cemento escogida se calcula que para realizar una mezcla de concreto con la resistencia deseada se deberá usar 309 kg de cemento, posteriormente. Para hallar la cantidad de agregado grueso en la mezcla primero se determina que la relación de volumen de agregado grueso por volumen de concreto será de 0.78, este valor se multiplica por el peso unitario SSS hallado,  $0.78 * 1514.8 = 1182 \text{ kg}$  de agregado grueso para la mezcla; por último, teniendo el volumen de cada componente se realiza el cálculo del volumen faltante correspondiente al agregado fino  $1000 \text{ m}^3 - (179 + 102.6 + 443) = 276 \text{ L}$  de agregado finos, que multiplicando por su peso específico se obtiene que se debe usar 689 kg.

**Tabla 20.** *Diseño por metro cubico de concreto 3000 psi*

| Diseño por metro cubico de concreto 3000 PSI |           |             |            |
|----------------------------------------------|-----------|-------------|------------|
| Componente                                   | Peso (Kg) | Volumen (L) | Proporción |
| Agua                                         | 179       | 179         |            |
| Cemento                                      | 309       | 102,6       | 1          |
| Agregado fino                                | 689       | 276         | 2          |
| Agregado grueso                              | 1182      | 443         | 4          |

Además de los agregados normales para la realización del concreto se consideró una segunda mezcla añadiéndole los materiales de PET y fique, para ello se consideró calcular la dosificación para el volumen total que se necesitaría para llenar los cilindros y vigas propuestos el cual es  $0.24 \text{ m}^3$ , y considerando el 5% de desperdicio que corresponde a  $0.012 \text{ m}^3$ , una vez hecho esto se calculó el peso de PET y fique, según el porcentaje de volumen escogido para agregar. Por lo tanto, para el volumen de  $0.12 \text{ m}^3$  que será el necesario para

las vigas y cilindros a realizar con fique y PET, se deberá usar 5.01 kg de PET correspondiente al 3% del volumen y 1.48 kg de fique correspondiente al 1.5% del volumen. Para esta segunda mezcla se debió ajustar la dosificación de los componentes para la mezcla, para esto se redujo el peso de la arena exactamente el peso que ocuparía el PET y el fique, siendo de 6.49 kg, por lo tanto, realmente se usaría 76.86 kg de agregados finos.

**Tabla 21.** *Dosificación verdadera para la mezcla de concreto*

| Dosificación verdadera para la mezcla de concreto |              |            |            |          |          |            |
|---------------------------------------------------|--------------|------------|------------|----------|----------|------------|
| Volumen (m3)                                      | Cemento (Kg) | Arena (kg) | Grava (kg) | Agua (l) | PET (kg) | Fique (kg) |
| 1,00                                              | 308,62       | 688,97     | 1181,53    | 179,00   |          |            |
| 0,12                                              | 37,33        | 83,35      | 142,935    | 21,65    |          |            |
| 0,12                                              | 37,33        | 76,86      | 145.935    | 21.65    | 5,01     | 1,48       |

Adicionalmente se consideró la absorción de los nuevos agregados, la absorción del PET es tan baja que fue despreciable siendo de 0.5%, pero la absorción del fique es bastante elevada, siendo de 62.7% del propio peso del material, lo cual indica que podría adsorber 0.9 L de agua, posteriormente se corrigió la cantidad de agua que se debía agregar a la mezcla pasando a ser 22.55 L.

#### 5.4 Elaboración de mezclas de concreto y fundición de probetas (Vigas – Cilindros)

Luego de completar los ensayos de caracterización de materiales y calcular los requisitos y parámetros establecidos por la norma ACI 211 para la dosificación necesaria en la preparación de la mezcla de concreto, se procedió a la elaboración de dos tipos de mezcla: concreto convencional y concreto con la inclusión de tereftalato de polietileno y furcraea andina. Estos dos tipos de mezcla se detallan en las tablas 2, 3 y 4. Posteriormente, se vertieron en cada una de las probetas, ya sean vigas o cilindros. La preparación de la mezcla

de concreto se llevó a cabo en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás de Bucaramanga, ubicado en el campus de Piedecuesta.

### 5.5 Procedimiento de la elaboración de la mezcla de concreto (Concreto convencional – Concreto + fique + PET)

- Después de caracterizar y realizar los ensayos de los materiales, antes de la realización de la mezcla se verifica las condiciones de humedad del agregado grueso (Grava) y el agregado fino (Arena). Se pudo considerar que el agregado grueso se encontraba en estado seco y el agregado fino contaba con una humedad de 1.25%, por lo tanto, se debía corregir la cantidad de agua que se iba a utilizar:  $Arena = 0.806\% (Absorción) - 1.25\% (Humedad) = -0.44\% * 83.35 \text{ kg} = -0.37 \text{ L}$ , Por lo tanto, el agua a utilizar en la mezcla quedaría de la siguiente forma,  $Agua f = 21.65 - 0.37 = 21.28 \text{ L}$ .

**Figura 8.** Condiciones de humedad de los materiales



- Se pesan en la balanza cada uno de los materiales a utilizar en la mezcla de concreto.
- Una vez pesado se procede a colocar las cantidades adecuadas de los diferentes materiales (Arena, grava) para 25 kg de cemento en la mezcladora, puesto que fue lo estipulado por el laboratorista, ya que el trompo no puede exceder de una cantidad de

materiales (Arena, grava) superiores para una mezcla de concreto de 25 kg de cemento.

- Se mezclan cada uno de los materiales en la mezcladora (trompo) para el primer tipo de mezcla sin ningún tipo de agregado, se le va añadiendo agua poco a poco de acuerdo con al diseño y a la dosificación de mezcla.

**Figura 9.** *Preparación de mezcla*



- Posteriormente obtenido la mezcla, se realiza el ensayo de asentamiento (prueba de cono de Abrams) el cual este ensayo antes de fundir en las probetas es fundamental ya que es un ensayo de control de calidad con el fin de medir la consistencia del concreto. De esta manera el concreto en esta prueba tuvo una consistencia de 2.2 pulgadas.

**Figura 10.** *Concreto convencional en ensayo de asentamiento*

- Por consiguiente, con una esponja se aplica aceite vegetal a las probetas (Vigas – Cilindros) con el fin de que después de 24 horas de ser fundidos, el concreto no se pegue a las probetas y se desencofre de una manera correcta sin afectar las vigas ni los cilindros.
- Se funde cada una de las probetas (Cilindros – Vigas).

**Figura 11.** *Fundición de cilindros*

- Se espera 24 horas de fraguado de los Cilindros y las vigas.

**Figura 12.** *Cilindros y vigas fundidos*

- Se desencofran cada una de las probetas (Cilindros – Vigas).
- Después de esto, una vez desencofrado cada uno de las vigas y cilindros son situados en la pileta para que cumplan con el tiempo de curado establecido.

**Figura 13.** *Tiempo de curado cilindros y vigas*

- Se mezclan cada uno de los materiales en la mezcladora (trompo) para el segundo tipo de mezcla de concreto con adición de tereftalato de polietileno y furcraea andina, se le va añadiendo agua poco a poco de acuerdo con al diseño y a la dosificación de mezcla.

**Figura 14.** *Mezcla del 2 tipo de mezcla con agregados*



**Figura 15.** *Mezcla del concreto con adición de tereftalato de polietileno y furcraea andina*



- Una vez obtenida la mezcla, se realiza el ensayo de asentamiento (prueba de cono de Abrams). En la cual el concreto en esta prueba tuvo una consistencia de 2.4 pulgadas.

**Figura 16.** *Concreto con adición de tereftalato de polietileno y furcraea andina en ensayo de asentamiento*



- Por otro lado, con una esponja se aplica aceite vegetal a las probetas (Vigas – Cilindros).
- Se funde cada una de las probetas (Cilindros – Vigas).

**Figura 17.** *Fundiciones de cilindros y vigas con el 2 tipo de mezcla*



- Se espera 24 horas de fraguado de los Cilindros y las vigas.
- Se desencofran cada una de las probetas con el segundo tipo de mezcla (Cilindros – Vigas).

- Después de esto, una vez desencofrado cada uno de las vigas y cilindros son situados en la pileta para que cumplan con el tiempo de curado establecido.

**Figura 18.** *Tiempo de curado de cilindros de concreto con adición de tereftalato de polietileno y furcraea andina*



## 6. Ensayos de probetas de concreto (Vigas – Cilindros)

Luego de tener en cuenta el tiempo de fraguado de las probetas (Vigas – Cilindros), se procede a realizar los ensayos en las maquinas a compresión (Cilindros) y flexión (Vigas) de la universidad Santo Tomas de Bucaramanga en el campus Piedecuesta de acuerdo con los tiempos de curado de 7,14, 28 días y las cantidades dadas basándose en la norma NTC 2871-NTC 673 [21] y siendo previamente supervisados a cargo del laboratorista de la misma Universidad.

**Figura 19.** *Ensayos de probetas a flexión y compresión*



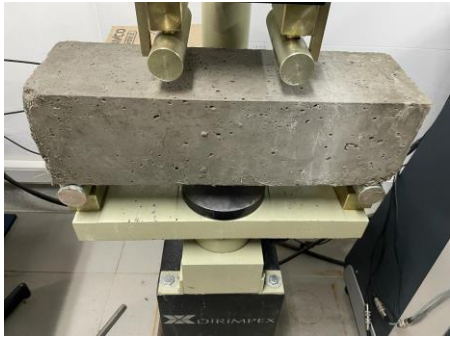
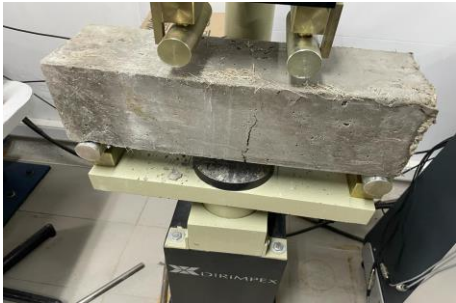
6.1 Comparativa entre las probetas (Cilindros y vigas) obtenidas.

Una vez cumplido los tiempos de curado correspondientes, las probetas son sacadas de la pileta y observadas, de esta forma se comparó las características físicas de estas, esto se recopila en la tabla.

Tabla 22. Observación comparativa entre los cilindros de las diferentes mezclas

| Tipo de mezcla          | 7 días                                                                                                                                                                                                                                                                        | 14 días                                                                              | 28 días                                                                               |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Convencional            |                                                                                                                                                                                             |   |   |
| Observaciones           | Los cilindros presentan un color gris opaco, característico del concreto normal, su superficie se ve y se siente lisa, solo la parte superior e inferior se nota algo rugosa, y presenta pocas porosidades, se ve un elemento robusto y denso.                                |                                                                                      |                                                                                       |
| Concreto de PET y Fique |                                                                                                                                                                                            |  |  |
| Observaciones           | Los cilindros presentan un color gris opaco, pero con algunas manchas más claras, lo más resaltante es que se ven trazas del fique por toda la superficie, su superficie no es tan lisa y presenta varias partes rugosa, se ve un elemento no tan denso como el convencional. |                                                                                      |                                                                                       |

**Tabla 23.** Observación comparativa entre las vigas de las diferentes mezclas

| Tipo de mezcla          | 7 días                                                                                                                                                                                                                                      | 28 días                                                                             |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Convencional            |                                                                                                                                                            |   |
| Observaciones           | Las vigas presentan un color gris opaco, característico del concreto normal, su superficie se ve y se siente lisa, la superficie cerca de las esquinas se siente rugosas y presenta algunas porosidades, se ve un elemento robusto y denso. |                                                                                     |
| Concreto de PET y Fique |                                                                                                                                                           |  |
| Observaciones           | Las vigas presentan un color gris opaco con varias manchas más claras, su superficie se ve y se siente rugosa, la superficie presenta varias porosidades, se notan trazas del fique añadido en especial en los vértices del elemento.       |                                                                                     |

7. Análisis de resultados

Una vez realizado cada uno de los ensayos a flexión y compresión, se obtienen los diferentes resultados.

7.1 Ensayos a compresión de cilindros

En cuanto a la resistencia de los cilindros a compresión, a continuación, en la tabla se puede evidenciar las diferentes resistencias en cuanto a los dos tipos de mezcla con un tiempo de curado de 7, 14 y 28 días.

**Tabla 24.** *Datos de ensayo a compresión de cilindros a 7 días*

| 7 días   |             |               |           |                       |
|----------|-------------|---------------|-----------|-----------------------|
| Cilindro | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Peso (Kg) | Característica        |
| C1       | 30,5        | 15            | 13,1      | Concreto Convencional |
| C2       | 30,5        | 15            | 13,1      | Concreto Convencional |
| C3       | 30,5        | 15            | 13,3      | Concreto Convencional |
| C4       | 30,5        | 15            | 12,1      | PET + Fique           |
| C5       | 30,5        | 15            | 12,4      | PET + Fique           |
| C6       | 30,4        | 15,3          | 10,8      | PET + Fique           |

**Tabla 25.** *Datos de resistencia y esfuerzos de cilindros a 7 días*

| Tabla de esfuerzos a 7 días |            |                |
|-----------------------------|------------|----------------|
| Cilindro                    | Carga (kN) | $\sigma$ (Mpa) |
| C1                          | 160,6      | 9,09           |
| C2                          | 164,9      | 9,33           |
| C3                          | 168,4      | 9,53           |
| C4                          | 58,6       | 3,32           |
| C5                          | 68,1       | 3,86           |
| C6                          | 66,5       | 3,62           |

**Tabla 26.** *Datos de ensayo a compresión de cilindros a 14 días*

| 14 días  |             |               |           |                       |
|----------|-------------|---------------|-----------|-----------------------|
| Cilindro | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Peso (Kg) | Característica        |
| C7       | 30          | 15,2          | 13,1      | Concreto Convencional |
| C8       | 30,5        | 15            | 13,2      | Concreto Convencional |
| C9       | 30          | 15            | 13        | Concreto Convencional |
| C10      | 30          | 15            | 12        | PET + Fique           |
| C11      | 30,5        | 15,2          | 12,5      | PET + Fique           |
| C12      | 30,5        | 15,5          | 11,8      | PET + Fique           |

**Tabla 27.** *Datos de resistencia y esfuerzos de cilindros a 14 días*

| Tabla de esfuerzos a 14 días |            |                |
|------------------------------|------------|----------------|
| Cilindro                     | Carga (kN) | $\sigma$ (Mpa) |
| C7                           | 184,4      | 10,16          |
| C8                           | 205,5      | 11,63          |
| C9                           | 201,2      | 11,39          |
| C10                          | 89,7       | 5,08           |
| C11                          | 70,7       | 3,89           |
| C12                          | 92,8       | 4,92           |

**Tabla 28.** *Datos de ensayo a compresión de cilindros a 28 días*

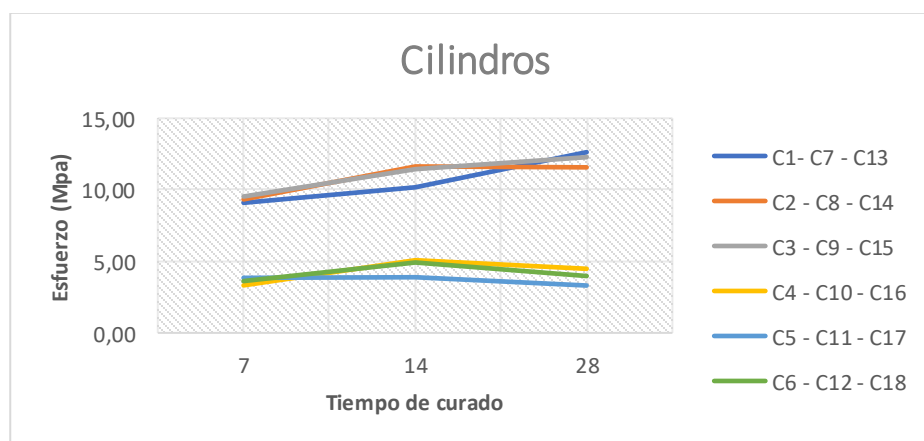
| 28 días |  |  |  |  |
|---------|--|--|--|--|
|---------|--|--|--|--|

| Cilindro | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Peso (Kg) | Característica        |
|----------|-------------|---------------|-----------|-----------------------|
| C13      | 30,2        | 15,2          | 12,5      | Concreto Convencional |
| C14      | 30,1        | 15,3          | 12,6      | Concreto Convencional |
| C15      | 30,2        | 15,2          | 12,6      | Concreto Convencional |
| C16      | 30,5        | 15,5          | 11,8      | PET + Fique           |
| C17      | 30,2        | 15,3          | 10,9      | PET + Fique           |
| C18      | 31          | 15            | 11        | PET + Fique           |

**Tabla 29.** Datos de resistencia y esfuerzos de cilindros a 28 días

| Tabla de esfuerzos a 28 días |            |                |
|------------------------------|------------|----------------|
| Cilindro                     | Carga (kN) | $\sigma$ (Mpa) |
| C13                          | 223,2      | 12,63          |
| C14                          | 212,6      | 11,57          |
| C15                          | 222,8      | 12,28          |
| C16                          | 79,2       | 4,48           |
| C17                          | 58,5       | 3,31           |
| C18                          | 69,7       | 3,94           |

**Figura 20.** Comparación de esfuerzos a través de la mezcla convencional y la mezcla con agregados

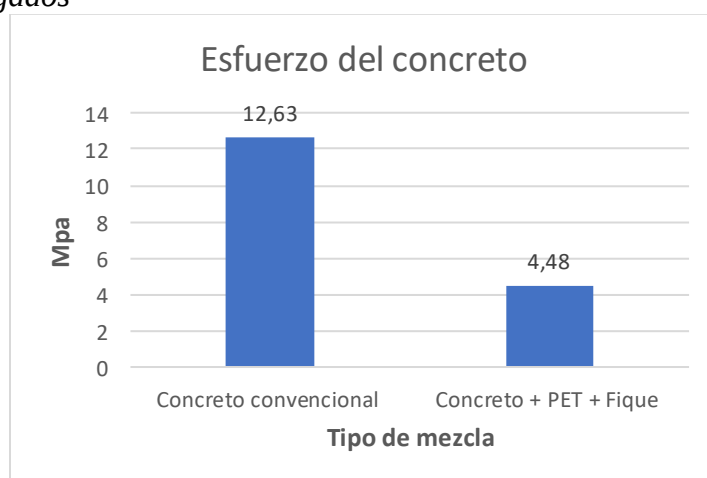


Según los datos obtenidos en el día 7 se puede evidenciar una gran diferencia en cuanto a la resistencia de los cilindros convencionales con respecto a los cilindros con los diferentes agregados en cada uno de los tiempos de curado establecidos, según la figura 20 los cilindros de concreto convencional alcanzan una resistencia mayor frente a los cilindros con diferentes agregados donde estos presentan una resistencia realmente baja.

Por consiguiente, para el día 14 el cambio no fue mayor, ya que las resistencias y los esfuerzos siguieron siendo mayores para el concreto convencional con respecto al concreto con los diferentes agregados.

Los resultados para el día 28 es muy similar a las diferentes edades donde la resistencia y el esfuerzo de concreto convencional en sus edades va aumentando con un crecimiento constante con respecto a la resistencia y el esfuerzo del otro tipo de mezcla, donde se observa un crecimiento lento en cuanto a la resistencia y esfuerzo en cada una de sus edades. Por otra parte, se puede observar que respecto al día 14 y 28 los cilindros con concreto de tereftalato de Polietileno (PET) y Furcraea andina (fique) no se presentó un aumento significativo en sus esfuerzos ya que los porcentajes entre una edad y la otra, es de 12% del C10 con respecto al C16, 15% del C11 con respecto al C17, y 20% del C12 con respecto al C18; lo que indica que para el tiempo de curado del día 28 no fue mucho el incremento del esfuerzo de estos cilindros.

**Figura 21.** Comparación de resistencia de cilindros a través de la mezcla convencional y la mezcla con agregados



**Nota:** Como se puede observar para la edad 28, el C13 de concreto convencional fue el que obtuvo mayor esfuerzo con respecto a los otros cilindros de los dos tipos de mezcla.

*Por consiguiente, el cilindro que tuvo menos esfuerzo y fallo más rápido fue el C16 estableciendo una diferencia entre un esfuerzo y otro en cuanto al concreto convencional con el concreto de tereftalato de polietileno y furcraea andina.*

La realización del ensayo a compresión en los cilindros genera en estos diferentes tipos de falla; donde en la tabla 22 se puede detallar el tipo de falla, el tipo de mezcla (Concreto convencional – Concreto de tereftalato de Polietileno (PET) y Furcraea andina (fique) y el tiempo de curado.

**Tabla 30. Tipo de falla de cilindros**

| TIPO DE MEZCLA                                                         | 7 DIAS                                                                              | 14 DIAS                                                                              | 28 DIAS                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Convencional                                                           |   |   |   |
|                                                                        | Tipo de falla:<br>Cono                                                              | Tipo de falla: Cono y<br>corte                                                       | Tipo de falla: Cono y<br>corte                                                        |
| Concreto de tereftalato de Polietileno (PET) y Furcraea andina (Fique) |  |  |  |
|                                                                        | Tipo de falla:<br>Cono                                                              | Tipo de falla: Cono                                                                  | Tipo de falla: Cono y<br>corte                                                        |

## 7.2 Ensayos a flexión de vigas

Con el propósito de evaluar la resistencia a la flexión de las vigas, se sometieron a cargas puntuales en sus puntos de inicio y final en el tercio central. Para determinar la resistencia a la flexión, se consideraron dos períodos de curado: uno de 7 días y otro de 28 días, aplicados a ambos tipos de vigas.

**Tabla 31.** *Datos de ensayo a flexión de vigas a 7 días*

| 7 días |             |           |                |           |                       |
|--------|-------------|-----------|----------------|-----------|-----------------------|
| Viga   | Altura (cm) | Área (cm) | Perímetro (cm) | Peso (Kg) | Característica        |
| V1     | 15          | 15        | 50             | 26,6      | Concreto Convencional |
| V2     | 15          | 15        | 50             | 26,4      | Concreto Convencional |
| V3     | 15          | 15        | 50             | 27        | Concreto Convencional |
| V4     | 15          | 15        | 50             | 24,6      | PET + Fique           |
| V5     | 15          | 15        | 50             | 23,7      | PET + Fique           |
| V6     | 15          | 15        | 50             | 22,1      | PET + Fique           |

**Tabla 32.** *Datos de resistencia y esfuerzos de vigas a 7 días*

| Tabla de esfuerzos a 7 días |            |                |
|-----------------------------|------------|----------------|
| Viga                        | Carga (kN) | $\sigma$ (Mpa) |
| V1                          | 12,82      | 1,71           |
| V2                          | 11,6       | 1,55           |
| V3                          | 14,00      | 1,87           |
| V4                          | 6,51       | 0,87           |
| V5                          | 6,16       | 0,82           |
| V6                          | 8,24       | 1,1            |

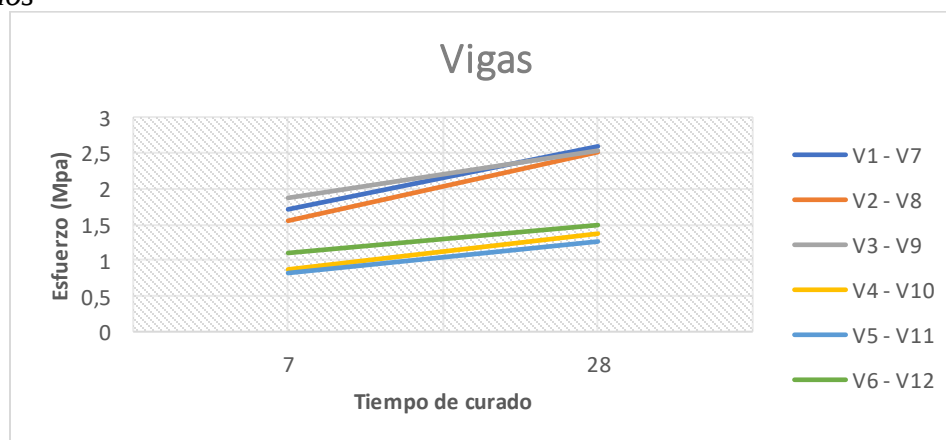
**Tabla 33.** *Datos de ensayo a flexión de vigas a 28 días*

| 28 días |             |           |                |           |                       |
|---------|-------------|-----------|----------------|-----------|-----------------------|
| Viga    | Altura (cm) | Área (cm) | Perímetro (cm) | Peso (Kg) | Característica        |
| V7      | 15          | 15        | 50             | 26,4      | Concreto Convencional |
| V8      | 15          | 15        | 50             | 26,5      | Concreto Convencional |
| V9      | 15          | 15        | 50             | 26,5      | Concreto Convencional |
| V10     | 15          | 15,2      | 50,2           | 23,1      | PET + Fique           |

|     |      |      |    |      |             |
|-----|------|------|----|------|-------------|
| V11 | 15   | 15   | 50 | 24,2 | PET + Fique |
| V12 | 15,2 | 15,5 | 50 | 23,5 | PET + Fique |

**Tabla 34.** Datos de resistencia y esfuerzos de vigas a 28 días

| Tabla de esfuerzos a 28 días |            |                |
|------------------------------|------------|----------------|
| Viga                         | Carga (kN) | $\sigma$ (Mpa) |
| V7                           | 19,44      | 2,59           |
| V8                           | 18,86      | 2,51           |
| V9                           | 19,00      | 2,53           |
| V10                          | 10,27      | 1,37           |
| V11                          | 9,42       | 1,26           |
| V12                          | 11,85      | 1,49           |

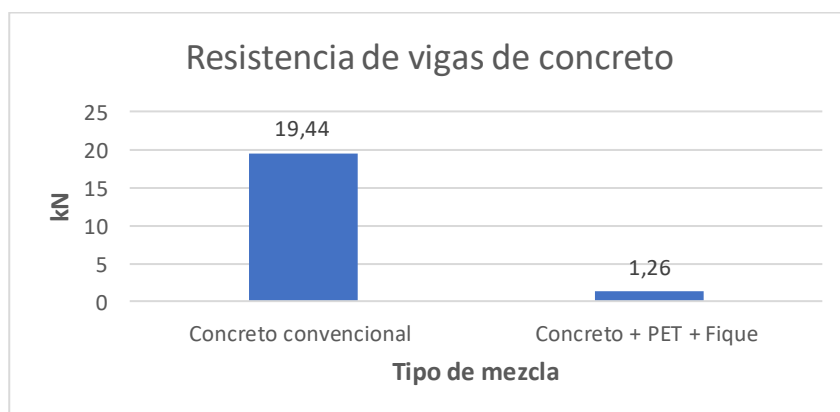
**Figura 22.** Comparación de esfuerzos a través de la mezcla convencional y la mezcla con agregados

En la edad 7 días se obtuvo una resistencia mayor para las vigas de concreto convencional respecto al otro tipo de viga, por otra parte, en cuanto al esfuerzo solo la viga V6 alcanzo el 1,1 MPa lo que nos indica que obtuvieron esfuerzos bajos.

Para la edad 28 no surgió ningún cambio con respecto a la edad 7, donde la resistencia y el esfuerzo del concreto convencional continuó siendo mayor que las vigas elaboradas de concreto de tereftalato de Polietileno (PET) y Furcraea andina (fique). A diferencia del

ensayo a compresión el esfuerzo de las vigas para la edad 7 y 28 del concreto de tereftalato de Polietileno (PET) y Furcraea andina (fique) tuvo un mayor aumento entre una edad y la otra; donde alcanzaron el 36% de la V4 con respecto a la V10, 35% de la V5 con respecto a la V11 y por último 26% de la V6 con la V12 entre las dos edades.

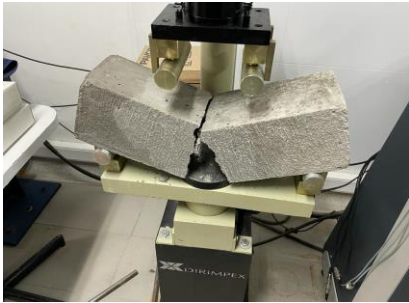
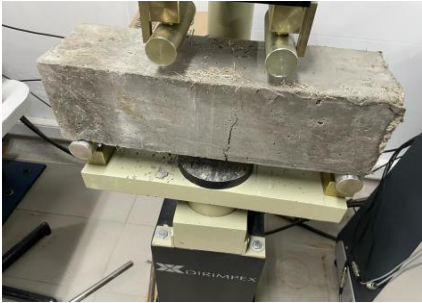
**Figura 23.** Comparación de resistencia a través de la mezcla convencional y la mezcla con agregados



**Nota:** En cuento a las vigas, la V7 de concreto convencional fue la que obtuvo mayor resistencia, alcanzando una amplia diferencia respecto a las demás vigas de concreto de tereftalato de Polietileno (PET) y furcraea andina (fique) para la edad de 28 días, puesto que la viga de concreto tereftalato de Polietileno (PET) y furcraea andina (fique) V11 fue la que tuvo menos resistencia y fallo más rápido para el tiempo de curado de 28 días.

En la siguiente tabla 27 se puede presentar las diferentes edades con las fallas de los diferentes tipos de vigas.

**Tabla 35.** *Tipo de falla de vigas*

| Tipo de mezcla                                                         | 7 días                                                                            | 28 días                                                                            |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Convencional                                                           |  |  |
|                                                                        | Tipo de falla: flexión                                                            | Tipo de falla: flexión                                                             |
| Concreto de tereftalato de Polietileno (PET) y Furcraea andina (Fique) |  |  |
|                                                                        | Tipo de falla: flexión                                                            | Tipo de falla: flexión                                                             |

*Nota:* según el tipo de fisuras presentadas en las vigas, se puede determinar que estas fallas se produjeron por flexión.

**7.3    Análisis de costos de cilindros y vigas en concreto convencional y concreto con adición de tereftalato de Polietileno (PET) y furcraea andina (fique).**

Con el fin de evaluar la factibilidad económica de la investigación, se ha preparado un presupuesto preliminar que abarca los gastos asociados a los materiales y suministros requeridos. En este análisis se llevó a cabo una comparación de los costos de los materiales necesarios para los dos tipos de mezcla: el concreto convencional y el concreto con la incorporación de tereftalato de Polietileno (PET) y furcraea andina (fique).

### 7.3.1 Costo de materiales

Se consideraron diversos presupuestos y se optó por seleccionar las cotizaciones más rentables para la preparación de los dos tipos de mezcla de concreto. A continuación, se detallan los costos individuales de los materiales para ambos tipos de mezcla de concreto.

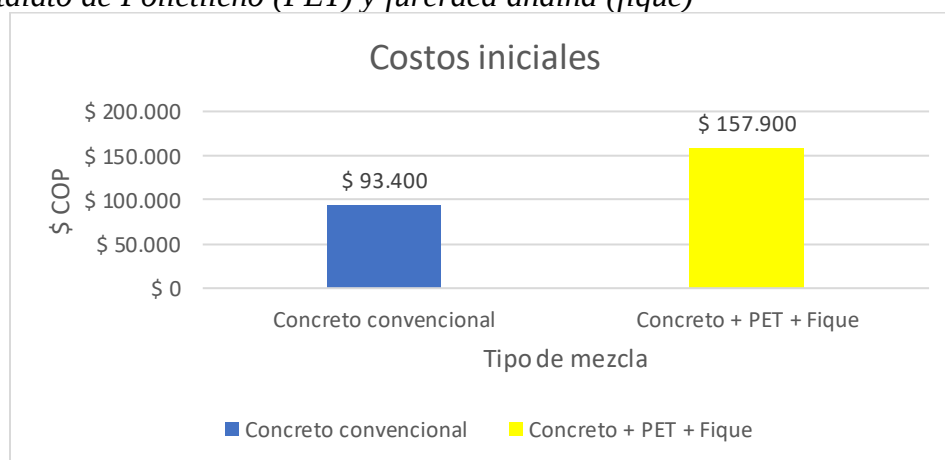
**Tabla 36.** Costo de materiales de concreto convencional

| Precios de materiales Concreto Convencional |               |     |              |                        |                   |              |
|---------------------------------------------|---------------|-----|--------------|------------------------|-------------------|--------------|
| Material                                    | Cantidad (kg) | min | Precio und   | Cantidad por usar (kg) | Cantidad (bultos) | Precio total |
| Cemento                                     | 50            |     | \$ 22.000,00 | 37,33                  | 1                 | \$ 22.000,00 |
| Arena (de rio)                              | 40            |     | \$ 16.800,00 | 83,35                  | 3                 | \$ 50.400,00 |
| Grava (Triturado 3/4)                       | 50            |     | \$ 7.000,00  | 142,93                 | 3                 | \$ 21.000,00 |
| Total                                       |               |     |              |                        |                   | \$ 93.400    |

**Tabla 37.** Costo de materiales de concreto con adición de tereftalato de Polietileno (PET) y furcraea andina (fique)

| Precios de materiales de concreto con adición de tereftalato de Polietileno (PET) y furcraea andina (fique). |               |     |              |                        |                   |               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----|--------------|------------------------|-------------------|---------------|
| Material                                                                                                     | Cantidad (kg) | min | Precio und   | Cantidad por usar (kg) | Cantidad (bultos) | Precio total  |
| Fique                                                                                                        | 1,5           |     | \$ 26.000,00 | 1,48                   | 1                 | \$ 26.000,00  |
| PET                                                                                                          | 10            |     | \$ 77.000,00 | 5,01                   | 1                 | \$ 38.500,00  |
| Cemento                                                                                                      | 50            |     | \$ 22.000,00 | 37,33                  | 1                 | \$ 22.000,00  |
| Arena (de rio)                                                                                               | 40            |     | \$ 16.800,00 | 83,35                  | 3                 | \$ 50.400,00  |
| Grava (Triturado 3/4)                                                                                        | 50            |     | \$ 7.000,00  | 142,93                 | 3                 | \$ 21.000,00  |
| Total                                                                                                        |               |     |              |                        |                   | \$ 157.900,00 |

**Figura 24.** Comparación de costos del concreto convencional con el concreto con adición de tereftalato de Polietileno (PET) y furcraea andina (fique)



Se puede observar que la elaboración de concreto convencional es menos costoso, teniendo en cuenta que al adicionar agregados al concreto convencional influye un precio adicional que se debería tener en cuenta, el concreto con adición de PET y fique es un 59.15% más caro. Lo que nos indica que es mucho más rentable elaborar concreto convencional para vigas y cilindros.

## 8. Conclusiones

Basándonos en los resultados de las pruebas de compresión realizadas, los cilindros de concreto con la adición de tereftalato de Polietileno (PET) y furcraea andina (fique) no lograron igualar ni superar la resistencia de los cilindros de concreto convencional. En los ensayos a los 28 días, se observó una diferencia de resistencia del 66%, 72% y 68% a favor de los cilindros de concreto convencional. El comportamiento de las vigas de concreto con adición de tereftalato de Polietileno (PET) y furcraea andina (fique) en cuanto a la resistencia a flexión siguió la misma tendencia que los cilindros a compresión; Las vigas de concreto convencional mostraron una mayor resistencia, con una diferencia de esfuerzo de alrededor

del 47%, 50% y 41% en los ensayos a los 28 días en comparación con las vigas con adición de tereftalato de Polietileno (PET) y furcraea andina (fique). Además, se observó que las vigas de concreto con adición de tereftalato de Polietileno (PET) y furcraea andina (fique) presentaban mayores fisuras y grietas, y tendían a colapsar de manera inmediata. En cuanto a las fallas, en los cilindros a compresión predominó la falla de cono y corte, mientras que, en las vigas sometidas a ensayos de flexión, la falla predominante fue la de flexión en la parte central de la luz de la viga.

Durante los ensayos, se pudo concluir que la mezcla de concreto, PET y fique no mejoró las propiedades mecánicas del material. De hecho, se obtuvieron menores resistencias. Esto pudo haber ocurrido debido a la adición del fique, principalmente. Al ser un componente orgánico y bastante absorbente de agua, generó gran porosidad en el concreto, lo que ocasionó espacios de aire en el elemento. Como resultado, se presentaron superficies de falla y una baja resistencia a los esfuerzos. Por ello se concluye que el fique no es un aditivo conveniente para el concreto.

Por otra parte, se pudo observar que el PET si se integraba de manera más uniforme a la mezcla de concreto, además de que tiene una absorción casi nula, se podría interpretar y según investigaciones antecedentes, este material al 3% del volumen añadido podría conseguir generar una mejora en el concreto.

En términos de costos, se determinó que la producción de concreto convencional resulta ser menos costosa en comparación con el concreto con adición de tereftalato de Polietileno (PET) y furcraea andina (fique). Específicamente, el concreto con adición de PET y fique es un 59.15% más caro. Esto se debe en parte al costo adicional de los agregados requeridos para la mezcla alternativa. De igual forma, se debe considerar que el PET se debió comprar debido a que no era factible hacer el reciclado y molido personalmente. Si se fuera

a emplear en la industria, se debería realizar todo el proceso con el fin de obtener costos generales más equilibrados.

A pesar de los resultados en cuanto a la resistencia y los costos, se reconoce que el tereftalato de Polietileno (PET) es un material respetuoso con el medio ambiente y podría ser considerado para su uso en elementos no estructurales dentro de proyectos de construcción. Esto se basa en sus características y propiedades ambientales, lo que sugiere su potencial aplicación en componentes que no requieren altos niveles de resistencia.

## **9. Recomendaciones**

- Se recomienda reducir el porcentaje de adición de fique, ya que la alta absorción de agua del furcraea andina (fique) disminuye su adherencia a los diversos agregados del concreto y aumenta la porosidad, lo que a su vez reduce la resistencia del concreto.
- Se sugiere mantener el porcentaje de Tereftalato de Polietileno (PET) por debajo del 3% y el de furcraea andina (fique) por debajo del 0,3%. Esto favorecerá una mejor compactación y manejabilidad al mezclar con los demás agregados en la preparación del concreto. Además, permitirá un período de curado prolongado, más allá de los 28 días convencionales, para evaluar la resistencia de los materiales en el concreto a edades mayores.
- En función de las propiedades del Tereftalato de Polietileno (PET), se podría considerar su implementación en concretos no estructurales, morteros y mampostería. Dadas las características y propiedades del Tereftalato de Polietileno (PET), se recomienda llevar a cabo una investigación exhaustiva para evaluar su capacidad

como sustituto de cierta cantidad de agregado grueso y fino en la mezcla de concreto, analizando su uso y su resistencia.

- Se propone sustituir el material de fibra de furcraea andina (fique) por Poliestireno, realizando una investigación para evaluar su aplicabilidad en el concreto, su resistencia y su impacto económico. El Poliestireno presenta ventajas como una buena compatibilidad con otros agregados en el concreto, además de ser económico, ligero y poseer propiedades aislantes térmicas, lo que podría mejorar la resistencia a la compresión.

### Referencias

- [1] F. Ballester, "Contaminación atmosférica, cambio climático y salud", 2005. [En línea]. Available: <https://scielo.isciii.es/pdf/resp/v79n2/colaboracion3.pdf>. [Último acceso: Marzo 2023].
- [2] J. Campana y R. Flores, "Comportamiento de los plásticos reciclados PET en la resistencia a compresión y flexión del concreto f<sup>c</sup> 210", 2019. [En línea]. Available: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/56681>. [Último acceso: Marzo 2023].
- [3] G. Valdés y O. Reyes, "Aplicación de los residuos de hormigón en materiales de construcción", Junio 2011. [En línea]. Available: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0122-34612011000100003](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612011000100003). [Último acceso: Abril 2023].
- [4] R. Silva y H. Ochoa, "Integración de PET reciclado a flexión en un elemento constructivo de concreto", 7 Diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://revistavivienda.cuaad.udg.mx/index.php/rv/article/view/106>. [Último acceso: Marzo 2023].
- [5] G. Neumann, "Análisis de costos y eficiencia del encofrado de plástico en columnas y vigas", 18 Diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/12676>. [Último acceso: Abril 2023].
- [6] R. Gaggino, "Elementos constructivos con PET reciclado", Diciembre 2003. [En línea]. Available: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/150144>. [Último acceso: Marzo 2023].

- [7] J. Jiménez y A. Ortiz, "Uso de materiales alternativos para mejorar las propiedades mecánicas del concreto (fibra de fique).", 2011. [En línea]. Available: <https://repository.ugc.edu.co/handle/11396/1137?locale-attribute=en>. [Último acceso: Marzo 2023].
- [8] Y. Ayala del toro, H. Delgado, V. Cuellar y A. Salazar, "Manual de ensayos para laboratorio agregados (ag) para mezclas asfálticas", 2019. [En línea]. Available: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt551.pdf>. [Último acceso: Marzo 2023].
- [9] R. Contreras, "Los pesos unitarios de los agregados y el contenido de humedad", 24 Septiembre 2016. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/kedynamirezgil/laboratorio-de-concreto-n3los-pesos-unitarios-de-los-agregados-y-el-contenido-de-humedad>. [Último acceso: Marzo 2023].
- [10] CEMEX, "Diseño de mezclas de Concreto ACI comité 211", 9 Septiembre 2019. [En línea]. Available: [https://www.academia.edu/40296179/Diseño\\_de\\_mezclas\\_de\\_Concreto\\_ACI\\_COMITÉ\\_211](https://www.academia.edu/40296179/Diseño_de_mezclas_de_Concreto_ACI_COMITÉ_211). [Último acceso: Marzo 2023].
- [11] J. Joaqui y C. Montes, "comportamiento mecánico a la flexión y compresión del concreto reforzado con fibra de fique en vigas y cilindros.", 2020. [En línea]. Available: <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/1e3731cd-0e83-49ac-9de4-5e8136f572f0/content>. [Último acceso: Mayo 2023].

- [12] L. Cabarcas y J. Colpas, "Evaluación de la resistencia a la flexión y compresión de un concreto estructural ecológico con fibras pet propuesto conforme a la norma NSR-10", 2020. [En línea]. Available: <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/7835?locale-attribute=en>. [Último acceso: Marzo 2023].
- [13] R. Cueva y L. Palacios, "Diseño de concreto para elementos no estructurales utilizando fibras de plástico PET, en la ciudad de Piura", 2020. [En línea]. Available: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/52174>. [Último acceso: Marzo 2023].
- [14] I. Mendoza y S. Chavez, "Residuos de construcción y demolición como agregado de concreto hidráulico nuevo", 2 Enero 2017. [En línea]. Available: [https://www.ecorfan.org/republicofperu/research\\_journals/Revista\\_de\\_Ingenieria\\_Civil/vol1num2/Revista\\_de\\_Ingeniería\\_Civil\\_V1\\_N2\\_4\\_2.pdf](https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Ingenieria_Civil/vol1num2/Revista_de_Ingeniería_Civil_V1_N2_4_2.pdf). [Último acceso: Mayo 2023].
- [15] Comision asesora permanente para el regimen de construcciones sismo resistentes, "Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10", 2010. [En línea]. Available: <https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/uploads/city/attachments/3871-10684.pdf>. [Último acceso: Marzo 2023].
- [16] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Resolución No. 1407. Por la cual se reglamenta la gestion ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, carton, plastico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones.", 26 Julio 2018. [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1407-de-2018/>. [Último acceso: Marzo 2023].

- [17] Congreso de Colombia, "Ley 1259, Por medio de la cual se instaura en el territorio nacional la aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros; y se dictan otras disposiciones.", 19 Diciembre 2008. [En línea]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=34388>. [Último acceso: Marzo 2023].
- [18] Congreso de Colombia, "Ley 1819, Por medio de la cual se adopta una reforma tributaria estructural, se fortalecen los mecanismos para la lucha contra la evasión y la elusión fiscal, y se dictan otras disposiciones.", 29 Diciembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=79140>. [Último acceso: Marzo 2023].
- [19] Congreso de Colombia, "Ley 1333, Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones.", 21 Julio 2009. [En línea]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=36879>. [Último acceso: Marzo 2023].
- [20] American Concrete Institute, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete", 2009. [En línea]. Available: [https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=211191&Format=DOWNLOAD&Language=English&Units=US\\_Units](https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=211191&Format=DOWNLOAD&Language=English&Units=US_Units). [Último acceso: Marzo 2023].
- [21] Icontec Internacional, "Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión", 4 Abril 2018. [En línea]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp->

metodo-de-ensayo-para-determinar-la-resistencia-del-concreto-a-la-flexion-  
utilizando-una-viga-simple-con-carga-en-los-tercios-medios-ntc2871-2018.html.

[Último acceso: Mayo 2023].

- [22] Icontec Internacional, "Ensayos de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto", 17 Noviembre 2021. [En línea]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp-concretos-metodo-de-ensayo-de-resistencia-a-la-compresion-de-especimenes-cilindricos-de-concreto-ntc673-2021.html>. [Último acceso: Mayo 2023].