

**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TEMA:**

**Desempeño físico del concreto con PET reciclado en el Ecuador.**

**AUTORES:**

**García González, Zoila Paulette**

**Giler Bollorino, Paolo Abel**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO CIVIL**

**TUTOR:**

**Alcívar Bastidas, Stefany Esther**

**Guayaquil, Ecuador**

**24 de febrero del 2023**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **García González, Zoila Paulette y Giler Bollorino, Paolo Abel**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

**TUTORA**

f. 

**Ing. Stefany Alcívar Bastidas, M. Sc.**

**DECANO DE LA FACULTAD**

f. 

**Ing. Federico Von Buchwald de Janon, Ph. D.**

**Guayaquil, a los 24 días del mes de febrero del año 2023**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **García González Zoila Paulette y Giler Bollorino Paolo Abel**

**DECLARAMOS QUE:**

El Trabajo de Titulación: **Desempeño físico del concreto con PET reciclado en el Ecuador**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de nuestra total autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, a los 24 días del mes de febrero del año 2023**

**AUTORES**

**García González Zoila Paulette**

**García González Zoila Paulette**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros, **García González Zoila Paulette y Giler Bollorino Paolo Abel**

Autorizamos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Desempeño físico del concreto con PET reciclado en el Ecuador**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 24 días del mes de febrero del año 2023**

**LOS AUTORES:**

**García González Zoila Paulette**

**Giler Bollorino, Paolo Abel**

# REPORTE URKUND

## Document Information

|                   |   |
|-------------------|---|
| Analyzed document | PROYECTO DE TITULACIÓN GILER P. GARCÍA 2 23-02-2023.docx (D159370246) |
| Submitted         | 2/24/2023 1:57:00 AM  |
| Submitted by      |   |
| Submitter email   | clara.glas@icu.ucsg.edu.ec  |
| Similarity        | 0%  |
| Analysis address  | clara.glas@analysis.urkund.com  |

## Sources included in the report

## Entire Document

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL  
TEMA: Desempeño físico del concreto con PET reciclado en el Ecuador  
AUTOR (ES):  
García González, Zoila Paulette Giler Bolorino, Paolo Abel  
Trabajo de titulación previo a la obtención del título de INGENIERO CIVIL  
TUTOR: Ing. Stefany Alcivar Bastidas, Msc  
Guayaquil, Ecuador (día) de (mes) del 2023  
ÍNDICE DE CONTENIDO CAPÍTULO I 13 1 INTRODUCCIÓN 13 1.1 Antecedentes 13 1.2 Objetivos 14 1.2.1 Objetivo General 14 1.2.2 Objetivos Específicos 14 1.3 Hipótesis 15 1.4 Justificación 15 CAPÍTULO II 17 2 MARCO TEÓRICO 17 2.1 Hormigón 17 2.2 Materiales 17 2.2.1 Cemento 17 2.2.2 Agregados 18 2.2.3 Agua 23 2.2.4 Aditivos 23 2.2.5 Tereftalato de polietileno (PET) 23 2.3 Ensayos de caracterización 25 2.3.1 Granulometría 25 2.3.2 Densidad y Absorción 25 2.4 Ensayos de las mezclas de hormigón en estado fresco 26 2.4.1 Revenimiento 26 2.4.2 Densidad y Contenido de aire 28 2.5 Ensayos de las mezclas de hormigón en estado endurecido 29 2.5.1 Compresión 29 2.5.2 Tracción indirecta 29 2.5.3 Resistencia a la penetración de iones cloruros 30 2.6 Elaboración de probetas 31 2.6.1 Mezclas convencionales de hormigón 31 2.6.2 Mezclas de hormigón modificadas con PET 31 CAPÍTULO III 36 3 MARCO METODOLÓGICO 36 3.1 Caracterización del plástico PET 36 3.1.1 Granulometría 36 3.1.2 Densidad y Absorción 39 3.2 Elaboración de probetas 41 3.2.1 Diseño de mezcla patrón 41 3.2.2 Diseño de mezclas modificadas con PET 42 3.2.3 Proceso de mezclado 45 3.2.4 Moldeo y Curado 46 3.3 Ensayos de las mezclas de hormigón en estado fresco 48 3.3.1 Revenimiento 48 3.3.2 Densidad y Contenido de aire 48 3.4 Ensayos de las mezclas de hormigón en estado endurecido 50 3.4.1 Compresión 50 3.4.2 Tracción Indirecta 52 3.4.3 Resistencia a la penetración de iones cloruros 52 CAPÍTULO IV 55 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 55 4.1 Revenimiento 55 4.2 Densidad y Contenido de aire 56 4.3 Compresión 58 4.4 Tracción indirecta 60 4.5 Resistencia a la penetración de iones cloruros 61 CAPÍTULO V 63 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 63 5.1 Conclusiones 63 5.2 Recomendaciones 64 Bibliografía 65  
ÍNDICE DE TABLAS Tabla 1 Datos técnicos de cemento Tipo HE 18 Tabla 2 Emisiones de CO2 por tonelada de árido producido 22 Tabla 3 Revisión de literatura 33 Tabla 4 Resumen de resultados cuantitativos disponibles en la literatura 34 Tabla 5 Resultados de ensayo de granulometría de la muestra de PET como árido fino 37 Tabla 6 Resultados de ensayo de densidad y absorción 41 Tabla 7 Dosificación de materiales del diseño patrón para obtener una mezcla de 1 m<sup>3</sup> 42 Tabla 8 Condiciones de los materiales empleados en el diseño patrón 42 Tabla 9 Dosificaciones de mezclas de hormigón 45 Tabla 10 Tiempo de mezclado de los materiales para producir hormigón 45 Tabla 11 Resultados de las propiedades físicas del hormigón en estado fresco y endurecido para distintas cantidades de PET 55 Tabla 12 Resultados del ensayo de compresión a la edad de 28 días en las probetas de hormigón 59 Tabla 13 Resultados del ensayo de tracción indirecta en las probetas de hormigón 60

## **Agradecimiento**

Primero, agradezco a Dios por cuidarme, por permitirme conocer a las personas que ahora forman parte de mi vida y por ser mi guía todo este tiempo.

A mis padres, Nery Giler y Sandra Bollorino, quienes me formaron y me educaron con amor y valores, quienes me acompañaron en todo momento en cada uno de los pasos que he dado y ser quienes me motivan a ser mejor, ustedes son la razón de todo lo que he conseguido. ¡Gracias!

A mi hermano Jesús, mi tía Eylin, mi tío Tito y mi abuela Mamina, quienes me han motivado, apoyado y aconsejado hasta el día de hoy.

A mi novia, Franchesca, por sus palabras de aliento, por todas las veces que me acompañó haciendo un trabajo, por todos los deliciosos postres que preparó y por ser un motivo para superarme y ser mejor cada día.

A mi tutora, Ing. Stefany Alcívar, y al Ing, Daniel Petroche por la paciencia y dedicación que tuvieron para guiarnos en este trabajo, por ser un ejemplo para nosotros y por impulsarnos a seguir aprendiendo.

A cada uno de los profesores, por los conocimientos impartidos y marcar mi camino en esta bella carrera.

A mis amigos, con los que sin importar que, las risas nunca faltaron.

Por último, a todas las personas que estuvieron y me han ayudado en este proceso, muchas gracias a todos.

**Paolo Abel Giler Bollorino**

## **Agradecimiento**

Agradezco a Dios por brindarme sabiduría y permitirme culminar esta etapa.

A mis padres, Willian y Panchita, por su amor, apoyo, paciencia y educación, por enseñarme que todo se consigue con esfuerzo y sacrificio; sobre todo por creer en mí y en que puedo lograr mis metas.

A mis hermanos Brenda y William, y sobrinos Alisson, Julieth y Mattew, por enseñarme el valor de la familia y por alegrar mis días con sus ocurrencias; gracias a ustedes los momentos de tristeza por las dificultades de la carrera fueron más llevaderos y cortos.

A mi Gamil, por ser el mejor amigo y motivador en este proceso; por siempre escucharme y apoyarme cuando más lo necesité.

A mi tutora Ing. Stefany Alcívar por permitirnos llevar este proceso con su guía, paciencia y dedicación, y al Ing. Daniel Petroche, por ser un gran motivador y maestro; gracias por compartir sus conocimientos y evidenciar la pasión por sus trabajos.

A mis amigos de la carrera, por ser un gran equipo en todo este proceso; en especial Carito, por siempre ser mi cómplice.

A mis profesores, por todo lo aprendido, gracias a ustedes la educación está en buenas manos.

Finalmente, quiero agradecer al equipo del Centro de Innovación de Holcim por brindarnos su ayuda y permitirnos utilizar sus instalaciones para llevar a cabo la parte experimental de nuestra tesis.

**Zoila Paulette García González**

## Dedicatoria

Dedicado a mi abuelo, Ernesto Bollorino.

- *Paolo Abel Giler Bollorino*



## Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi papá, Willian García, la estrella más brillante en el cielo, por ser el mejor y por creer en mí. Sé que estaría muy orgulloso y feliz por este logro.

- *Zoila Paulette García González*



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f.   
\_\_\_\_\_

**Ing. Stefany Alcívar Bastidas, M. Sc.**

TUTORA

f.   
\_\_\_\_\_

**Ing. Federico von Buchwald de Janon, Ph. D.**

DECANO DE LA FACULTAD

f.   
\_\_\_\_\_

**Ing. José Barros Cabezas, M. Sc.**

COORDINADOR DEL ÁREA

f.   
\_\_\_\_\_

**Ing. Daniel Petroche, M.Sc.**

OPONENTE

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO I.....   | 2  |
| 1 INTRODUCCIÓN .....  | 2  |
| 1.1 Antecedentes .....  | 2  |
| 1.2 Objetivos .....   | 3  |
| 1.2.1 Objetivo General .....                                  | 3  |
| 1.2.2 Objetivos Específicos.....                              | 3  |
| 1.3 Hipótesis.....  | 4  |
| 1.4 Justificación.....  | 4  |
| CAPÍTULO II.....  | 6  |
| 2 MARCO TEÓRICO.....  | 6  |
| 2.1 Hormigón.....   | 6  |
| 2.2 Materiales .....  | 6  |
| 2.2.1 Cemento .....   | 6  |
| 2.2.2 Agregados .....   | 7  |
| 2.2.3 Agua .....  | 12 |
| 2.2.4 Aditivos.....   | 12 |
| 2.2.5 Tereftalato de polietileno (PET) .....                  | 12 |
| 2.3 Ensayos de caracterización.....                           | 14 |
| 2.3.1 Granulometría .....                                     | 14 |
| 2.3.2 Densidad y Absorción.....                               | 14 |
| 2.4 Ensayos de las mezclas de hormigón en estado fresco ..... | 15 |
| 2.4.1 Revenimiento .....                                      | 15 |

|                   |   |    |
|-------------------|---|----|
| 2.4.2             | Densidad y Contenido de aire .....                            | 17 |
| 2.5               | Ensayos de las mezclas de hormigón en estado endurecido ..... | 18 |
| 2.5.1             | Compresión .....  | 18 |
| 2.5.2             | Tracción indirecta .....                                      | 18 |
| 2.5.3             | Resistencia a la penetración de iones cloruros.....           | 19 |
| 2.6               | Elaboración de probetas .....                                 | 20 |
| 2.6.1             | Mezclas convencionales de hormigón .....                      | 20 |
| 2.6.2             | Mezclas de hormigón modificadas con PET.....                  | 20 |
| CAPÍTULO III..... |   | 25 |
| 3                 | MARCO METODOLÓGICO.....                                       | 25 |
| 3.1               | Caracterización del plástico PET .....                        | 26 |
| 3.1.1             | Granulometría .....   | 26 |
| 3.1.2             | Densidad y Absorción.....                                     | 29 |
| 3.2               | Elaboración de probetas .....                                 | 31 |
| 3.2.1             | Diseño de mezcla patrón .....                                 | 31 |
| 3.2.2             | Diseño de mezclas modificadas con PET .....                   | 32 |
| 3.2.3             | Proceso de mezclado.....                                      | 35 |
| 3.2.4             | Moldeo y Curado .....   | 36 |
| 3.3               | Ensayos de las mezclas de hormigón en estado fresco .....     | 38 |
| 3.3.1             | Revenimiento .....  | 38 |
| 3.3.2             | Densidad y Contenido de aire .....                            | 38 |
| 3.4               | Ensayos de las mezclas de hormigón en estado endurecido ..... | 40 |
| 3.4.1             | Compresión .....  | 40 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.4.2 | Tracción Indirecta .....                             | 42 |
| 3.4.3 | Resistencia a la penetración de iones cloruros.....  | 42 |
|       | CAPÍTULO IV.....                                     | 45 |
| 4     | RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                         | 45 |
| 4.1   | Revenimiento.....                                    | 45 |
| 4.2   | Densidad y Contenido de aire .....                   | 46 |
| 4.3   | Compresión .....                                     | 48 |
| 4.4   | Tracción indirecta.....                              | 50 |
| 4.5   | Resistencia a la penetración de iones cloruros ..... | 51 |
|       | CAPÍTULO V .....                                     | 53 |
| 5     | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....                  | 53 |
| 5.1   | Conclusiones .....                                   | 53 |
| 5.2   | Recomendaciones.....                                 | 54 |
|       | Bibliografía .....                                   | 55 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1</b> Datos técnicos de cemento Tipo HE .....  | 7  |
| <b>Tabla 2</b> Emisiones de CO2 por tonelada de árido producido.....  | 11 |
| <b>Tabla 3</b> Revisión de literatura .....   | 22 |
| <b>Tabla 4</b> Resumen de resultados cuantitativos disponibles en la literatura .....   | 23 |
| <b>Tabla 5</b> Resultados de ensayo de granulometría de la muestra de PET como árido fino .....   | 27 |
| <b>Tabla 6</b> Resultados de ensayo de densidad y absorción.....  | 31 |
| <b>Tabla 7</b> Dosificación de materiales del diseño patrón para obtener una mezcla de 1 m <sup>3</sup> .....                           | 32 |
| <b>Tabla 8</b> Condiciones de los materiales empleados en el diseño patrón .....  | 32 |
| <b>Tabla 9</b> Dosificaciones de mezclas de hormigón .....  | 35 |
| <b>Tabla 10</b> Tiempo de mezclado de los materiales para producir hormigón .....   | 35 |
| <b>Tabla 11</b> Resultados de las propiedades físicas del hormigón en estado fresco y endurecido para distintas cantidades de PET ..... | 45 |
| <b>Tabla 12</b> Resultados del ensayo de compresión a la edad de 28 días en las probetas de hormigón .....                              | 49 |
| <b>Tabla 13</b> Resultados del ensayo de tracción indirecta en las probetas de hormigón   | 50 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> Curva granulométrica de la arena de río y Límites de agregado fino .....        | 8  |
| <b>Figura 2</b> Curva granulométrica del agregado grueso y Límites de agregado Nro.67. 9        |    |
| <b>Figura 3</b> Demanda mundial de áridos para la construcción en 2015 .....                    | 10 |
| <b>Figura 4</b> Muestra de PET empleada en el presente trabajo.....                             | 13 |
| <b>Figura 5</b> Aparatos necesarios para realizar ensayo de revenimiento en el concreto. 16     |    |
| <b>Figura 6</b> Ensayo de revenimiento en el concreto .....                                     | 16 |
| <b>Figura 7</b> Aparatos necesarios para realizar ensayos de densidad y contenido de aire ..... | 17 |
| <b>Figura 8</b> Ensayo para determinar la densidad en el concreto fresco.....                   | 17 |
| <b>Figura 9</b> Esquema de ensayo de tracción indirecta en cilindro de concreto .....           | 19 |
| <b>Figura 10</b> Metodología del trabajo experimental.....                                      | 25 |
| <b>Figura 11</b> Muestra de PET empleada para ensayo de granulometría.....                      | 26 |
| <b>Figura 12</b> Proceso de tamizaje realizado en tamizadora mecánica.....                      | 27 |
| <b>Figura 13</b> Curva granulométrica de la muestra de PET y Límites de agregado fino 28        |    |
| <b>Figura 14</b> Curva granulométrica de la muestra de PET y Límites de agregado Nro. 9 .....   | 29 |
| <b>Figura 15</b> Muestra de PET empleada para ensayo de densidad y absorción .....              | 30 |
| <b>Figura 16</b> Muestra de PET llevada al horno en ensayo de densidad y absorción.....         | 30 |
| <b>Figura 17</b> Elaboración de probetas de hormigón .....                                      | 36 |
| <b>Figura 18</b> Probetas de hormigón convencionales y modificadas con PET .....                | 36 |
| <b>Figura 19</b> Probetas de hormigón convencionales y modificadas con PET desencofradas .....  | 37 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 20</b> Curado de probetas de hormigón convencionales y modificadas con PET .....   | 37 |
| <b>Figura 21</b> Revenimiento obtenido en mezcla de hormigón modificada con 10% de PET.....  | 38 |
| <b>Figura 22</b> Recipiente y cámara de aire utilizados para ensayo de densidad y contenido de aire en el hormigón.....                                | 39 |
| <b>Figura 23</b> Medición de la masa de la mezcla de hormigón para obtener la densidad .....   | 39 |
| <b>Figura 24</b> Probeta de hormigón en prensa de ensayo de compresión .....   | 40 |
| <b>Figura 25</b> Placas de neopreno empleadas en ensayo de compresión de probetas de hormigón .....  | 41 |
| <b>Figura 26</b> Probetas de hormigón ensayadas a compresión a edad de 7 días.....   | 41 |
| <b>Figura 27</b> Probeta de hormigón preparada para ensayo de tracción indirecta .....   | 42 |
| <b>Figura 28</b> Pastillas de hormigón preparadas para realizar ensayo de resistencia a la penetración de iones cloruros.....                          | 43 |
| <b>Figura 29</b> Acondicionamiento de muestras de hormigón en cámara de vacío previo al ensayo de resistencia a la penetración de iones cloruros ..... | 43 |
| <b>Figura 30</b> Muestras de hormigón sometidas a ensayo de resistencia a la penetración de iones cloruros .....                                       | 44 |
| <b>Figura 31</b> Revenimiento en mezclas de hormigón para distintas cantidades de PET.....   | 46 |
| <b>Figura 32</b> Densidad en estado fresco de las mezclas de hormigón para distintas cantidades de PET.....  | 47 |
| <b>Figura 33</b> Contenido de aire en mezclas de hormigón para distintas cantidades de PET .....   | 48 |
| <b>Figura 34</b> Resistencia a la compresión en las probetas de hormigón a las edades de 7 y 28 días .....   | 49 |



|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 35</b> Resistencia a la tracción indirecta en las probetas de hormigón a la edad de 28 días ..... | 51 |
| <b>Figura 36</b> Resistencia a la penetración de iones cloruros .....                                       | 52 |

## RESUMEN

El presente trabajo estudia los efectos de incorporar PET triturado, como sustituto parcial del árido grueso, en las propiedades frescas y endurecidas de una mezcla convencional de hormigón con resistencia especificada de 28 MPa. Para esto se realizaron remplazos en base volumétrica en proporciones de 5%, 10%, 15% y 20% del árido grueso, y se realizaron ensayos de trabajabilidad, densidad, contenido de aire, y de resistencia a la compresión, tracción y penetrabilidad de iones cloruros, tanto en la mezcla patrón como en las mezclas modificadas, aplicando los estándares de ASTM. Los resultados demuestran que la trabajabilidad disminuyó al aumentar PET en porcentajes mayores a 5%; sin embargo, su consistencia se mantuvo plástica. El contenido de aire también aumentó al incorporar PET, en donde un remplazo de 20% generó un incremento de 107.14%. La densidad fresca no fue tan afectada, siendo 7.60% el máximo decremento. La resistencia a la compresión a los 28 días disminuyó al aumentar el porcentaje de PET, en donde los remplazos de 5%, 10%, 15% y 20% provocaron pérdidas de 14%, 24%, 31% y 37% respectivamente. Las pérdidas en la resistencia a la tracción siguen una tendencia similar a la anterior, con valores de 16%, 22%, 31% y 40% respectivamente. Finalmente, al aumentar el contenido de PET aumenta la permeabilidad del concreto, en donde remplazos de 5% y 20% causan aumentos de la carga eléctrica pasante igual a 6.06% y 29.98% respectivamente.

*Palabras clave:* Hormigón, Residuos de tereftalato de Polietileno, Propiedades Mecánicas del Hormigón, Resistencia a la Compresión, Permeabilidad del Hormigón.

## **Abstract**

This paper studies the effects of incorporating crushed PET, as a partial substitute for coarse aggregate, on the fresh and hardened properties of a conventional concrete mix with a specified strength of 28 MPa. For this, replacements were made on a volumetric basis in proportions of 5%, 10%, 15% and 20% of the coarse aggregate, and workability, density, air content, and resistance to compression, traction and chloride ions penetrability tests were carried out, both in the master mixture and in the modified mixtures, applying the ASTM standards. The results show that the workability decreased when increasing PET in percentages greater than 5%; however, its consistency remained plastic. The air content also increased by incorporating PET, where a 20% replacement generated an increase of 107.14%. The fresh density was not so affected, being 7.60% the maximum decrease. The compressive strength at 28 days decreased as the percentage of PET increased, where the replacements of 5%, 10%, 15% and 20% caused losses of 14%, 24%, 31% and 37% respectively. Losses in tensile strength follow a similar trend to the previous one, with values of 16%, 22%, 31% and 40% respectively. Finally, as the PET content increases, the permeability of the concrete increases, where replacements of 5% and 20% cause increases in the electric charge equal to 6.06% and 29.98%, respectively.

*Keywords:* Concrete, Polyethylene Terephthalate Waste, Mechanical Properties of Concrete, Compressive Strength, Permeability of Concrete.

# CAPÍTULO I

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

El (Banco Mundial, 2022) indica que actualmente alrededor del 56 % de la población mundial (4,400 millones de habitantes) vive en ciudades, y se espera que esta tendencia continúe, ya que para el año 2050 la población urbana aumentará a más del doble y aproximadamente 7 de cada 10 personas vivirán en ciudades. La correcta gestión de la urbanización contribuirá al crecimiento sostenible con el aumento de la productividad e innovación, debido a que más del 80% del producto interno bruto (PIB) mundial se genera en las ciudades (Banco Mundial, 2022)

De acuerdo con el (Banco Mundial, 2021), la población urbana del Ecuador ha aumentado de 1'539,300 habitantes en 1960, a 11'513,201 habitantes en 2021, es decir que ha incrementado en 7.5 veces en 61 años. El crecimiento de la población urbana supone un crecimiento en la industria de la construcción, puesto que aumenta la demanda de viviendas, infraestructuras y edificios comerciales, impulsando las actividades en este sector.

En la industria de la construcción, la materia prima empleada para la fabricación de cemento y mezclas de hormigón proviene en gran parte de la minería y la explotación de canteras, las cuales son actividades que tienen un impacto ambiental negativo; algunas de estas afectaciones son los cambios en la composición y calidad de los recursos hídricos, contaminación del suelo por presencia de metales, contaminación del aire, degradación de hábitats y ecosistemas, generación de ruido y polvo, etc. La escasez y agotamiento de la materia prima también figuran como consecuencias en el desarrollo de estas actividades.

El PET fue sintetizado por primera vez en América del Norte a mediados de la década de 1940 por químicos de DuPont que se encontraban en la búsqueda de fibras sintéticas. Actualmente más del 50% de las fibras sintéticas están hechas de PET, denominado "poliéster" cuando se utiliza para aplicaciones de fibra o tejido. Cuando se utiliza para embalaje y otros fines, se denomina PET o plástico PET (Plastipak, 2022).

Como se indica en el informe de (Alianza Global para Alternativas a la Incineración, 2021), Ecuador es uno de los principales importadores de desechos plásticos en América Latina, recibiendo 3,665 toneladas de estos desechos entre los meses de enero a agosto del año 2020, de las cuales 295 toneladas corresponden a desperdicios de tereftalato de polietileno (PET).

En el informe de la Universidad Andina Simón Bolívar (Solíz et al., 2022) exponen que entre los periodos de 2018 a 2020 Ecuador recibió un total de 13,147.67 toneladas de desechos plásticos correspondientes a botellas de tereftalato de polietileno cuyo origen son las importaciones.

Actualmente existen diversas investigaciones que han estudiado los efectos de la inclusión de residuos de PET procedentes del reciclaje en las mezclas de hormigón, con la finalidad de producir materiales de construcción de baja huella de CO<sub>2</sub>.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el comportamiento físico y mecánico del concreto simple con contenido de PET triturado como sustituto del árido grueso en diferentes porcentajes.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilar información existente sobre la inclusión de PET triturado en el hormigón simple, mediante una revisión de literatura.
- Determinar características físicas como granulometría, densidad y absorción de la muestra de PET mediante ensayos de laboratorio y aplicando las normas correspondientes.
- Diseñar las mezclas a ensayar considerando las propiedades físicas de los materiales y la resistencia objetivo del hormigón.
- Comparar las propiedades mecánicas entre el concreto simple y el concreto modificado con PET, mediante los resultados obtenidos en los ensayos.

### **1.3 HIPÓTESIS**

Porcentajes de remplazo de 5% a 20% del árido grueso por residuos de tereftalato de polietileno (PET) no afectarán de forma significativa las propiedades mecánicas del hormigón.

### **1.4 JUSTIFICACIÓN**

La importancia de la realización de este estudio radica en la finalidad de disminuir la demanda de grandes volúmenes de materiales pétreos en la industria de la construcción, mediante su remplazo por residuos de tereftalato de polietileno (PET); de esta manera se pueden reducir los impactos ambientales generados por la explotación de estos recursos, y la contaminación mediante el reciclaje de residuos de PET, aprovechando sus características como la resistencia a la degradación y su peso liviano.

Resultados obtenidos por (Bamigboye et al., 2022) indican que existe un aumento en la trabajabilidad y consistencia del hormigón al incorporar PET. Experimentaciones realizadas por (Dawood et al., 2021) concluyeron que sustituir 7.5% del árido fino por PET genera un incremento de la resistencia a la compresión. Mediante la revisión literaria se infirió que el comportamiento de la mezcla modificada también depende de la forma del PET, ya sean fibras, gránulos, PET triturado o en forma de hojuelas, etc.

Se establecieron porcentajes de remplazo entre 5% y 20% porque en estudios previos, como el de (Frigione, 2010), se indica que la resistencia a la compresión disminuye a partir de una sustitución de 5%. Sin embargo, en varias investigaciones se obtuvo que efectos negativos en el desempeño físico del hormigón ocurren en remplazos considerablemente altos de los áridos, en el orden de 30% en adelante; por ejemplo, (Kangavar et al., 2022) consiguieron la resistencia a la compresión prevista para el hormigón con un contenido de 10% y 30% de gránulos de PET, y (Bamigboye et al., 2022) obtuvieron que en remplazos de 30 a 100% no se alcanzó la resistencia especificada.

Es necesario determinar la dosificación adecuada de materiales empleados en la elaboración de mezclas de hormigón y el porcentaje óptimo de remplazo de áridos por residuos de PET triturado, de manera que se obtengan comportamientos idóneos en

diferentes pruebas mecánicas, y por consiguiente confirmar los resultados obtenidos en investigaciones previas. Resultados positivos permitirán la obtención de materiales con una menor huella de carbono, por consiguiente, el planteamiento de proyectos cuyo objetivo sea la fabricación de esta mezcla en masa.

## **CAPÍTULO II**

### **2 MARCO TEÓRICO**

Este capítulo se enfocará en la descripción del hormigón, de los materiales utilizados en la preparación de mezclas convencionales de hormigón y del tereftalato de polietileno (PET), que es el componente modificador de estas mezclas. Se describirán los ensayos realizados para caracterizar al plástico PET, las pruebas para determinar las propiedades de las mezclas de hormigón en estado fresco y endurecido, y se detallará el proceso de elaboración de probetas.

En esta sección también se explicará el impacto ambiental generado por la explotación de canteras.

#### **2.1 HORMIGÓN**

El hormigón es una mezcla de dos componentes: áridos y pasta. La pasta, compuesta de cemento y agua, que se une con los agregados (generalmente arena y grava o piedra triturada) siendo una masa parecida a una roca a medida que la pasta se endurece debido a la reacción química del cemento y el agua. También se pueden incluir en la pasta materiales complementarios y aditivos químicos. (Kosmatka, Steven H.; Wilson, 2003)

#### **2.2 MATERIALES**

##### **2.2.1 CEMENTO**

El cemento hidráulico, empleado en la fabricación de hormigón, es un material compuesto de silicatos, aluminatos y cal, y tiene la propiedad de fraguar y endurecerse cuando se combina con agua (Neville, 2013).

En este trabajo se utilizó cemento Holcim Tipo HE, el cual es un cemento hidráulico de alta resistencia inicial fabricado bajo las normas ASTM C1157 y NTE INEN 2380 (Holcim, 2022). En la Tabla 1 se indican los datos técnicos del cemento Tipo HE. Cabe mencionar que el cemento utilizado en todas las mezclas proviene de un mismo lote con el objetivo de evitar alteraciones en los resultados.



**Tabla 1***Datos técnicos de cemento Tipo HE*

|   | INEN<br>2380 | Valor referencial<br>HOLCIM<br>PREMIUM |
|---|--------------|--|
| Cambio de longitud por autoclave, % máximo        | 0.8          | -0.02                                  |
| Tiempo de fraguado, método de Vicat               |              |  |
| Inicial, no menos de, minutos                     | 45           | 130                                    |
| Inicial, no más de, minutos                       | 420          |  |
| Contenido de aire mortero, en volumen, %          | -            | 5                                      |
| Resistencia a la compresión, mínimo MPa           |              |  |
| 1 día   | 12           | 14                                     |
| 3 días  | 24           | 27                                     |
| 7 días  | -            | 34                                     |
| 28 días   | -            | 42                                     |
| Expansión en barras de mortero 14 días, %<br>máx. | 0.02         | 0.002                                  |
| Resistencia a sulfatos, 6 meses                   | -            | -                                      |

*Nota.* Adaptada de *Ficha técnica – Cemento Holcim Premium* (p.2) por (Holcim, 2022).

### 2.2.2 AGREGADOS

Por lo general los agregados se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos consisten en arena natural o fabricada con tamaños de partículas de hasta 9.5 mm (3/8 pulg.); los agregados gruesos son partículas retenidas en el tamiz de 1.18 mm (Nº 16) y que varían hasta 150 mm (6 pulgadas) de tamaño. El tamaño máximo del agregado grueso es típicamente de 19 mm o 25 mm (3/4 pulg. o 1 pulg.). A veces se agrega un agregado de tamaño intermedio, alrededor de 9.5 mm (3/8 pulg.), para mejorar la gradación general del agregado. (Kosmatka, Steven H.; Wilson, 2003)

Comúnmente los áridos son obtenidos a través de la explotación de minas naturales o en fosas de arena y grava, canteras, extracción de sedimentos subterráneos o dragado

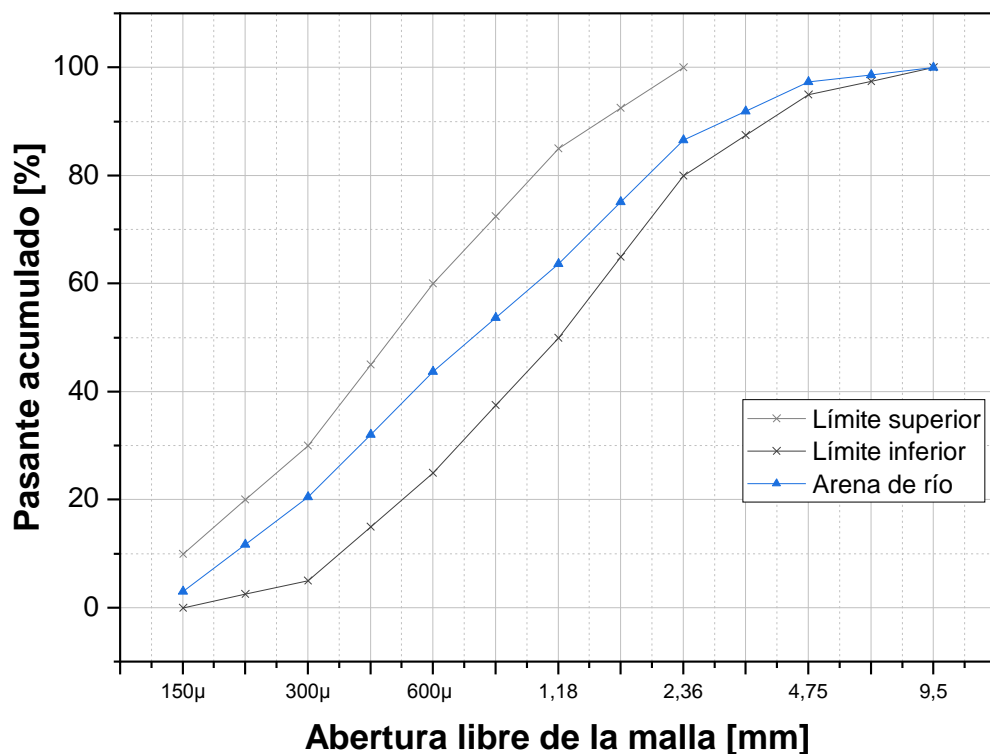
de depósitos sumergidos. El agregado grueso se obtuvo de la cantera Loma Alta de Holcim, y el agregado fino fue proporcionado por la arenera Anropevi, y es proveniente de ríos.

Se utilizó piedra de tamaño 67 como agregado grueso y arena natural como agregado fino. Estos agregados fueron clasificados de acuerdo con los límites de las especificaciones de ASTM C33/33M que define los requisitos para la clasificación y la calidad de los agregados gruesos y finos utilizados para el concreto, y NTE INEN 872.

Las densidades de la piedra Nro. 67 y de la arena son  $2,685 \text{ kg/m}^3$  y  $2,846 \text{ kg/m}^3$  respectivamente. La granulometría del agregado fino se presenta en la Figura 1, y la granulometría del agregado grueso en la Figura 2. Esta información fue proporcionada por Holcim.

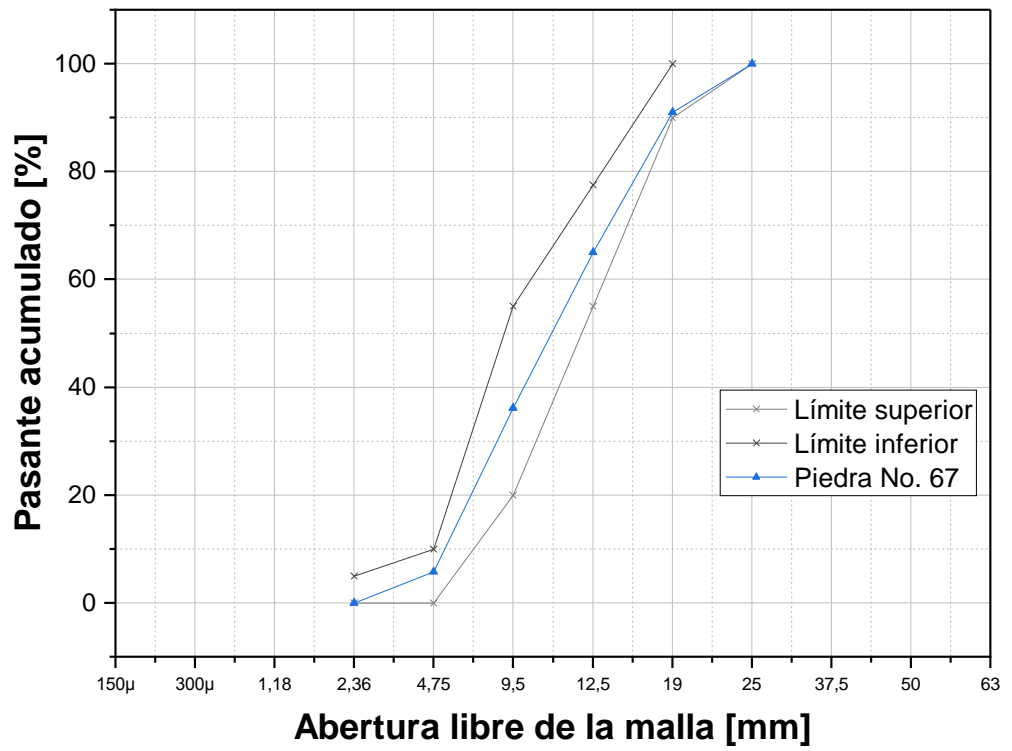
**Figura 1**

*Curva granulométrica de la arena de río y Límites de agregado fino*



**Figura 2**

*Curva granulométrica del agregado grueso y Límites de agregado Nro.67*



### 2.2.2.1 Impacto ambiental por la explotación de canteras

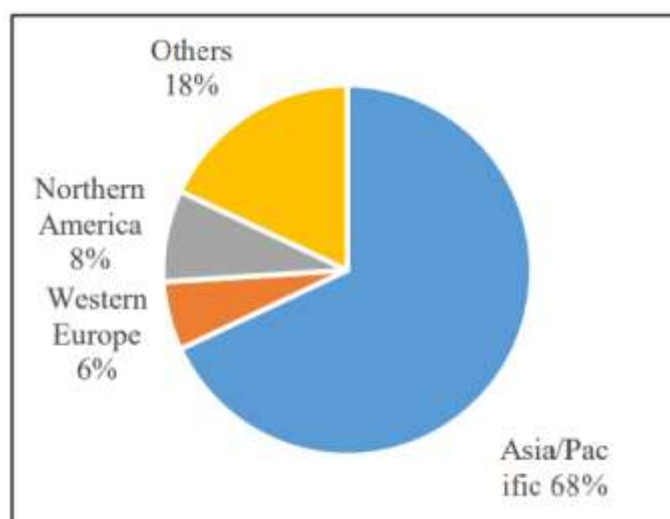
La construcción de infraestructuras consume enormes cantidades de áridos naturales. Citando a (Kamaruddin et al., 2019), se calcula que aproximadamente el 40% de la producción mundial de áridos es consumida por la industria de la construcción, siendo los países de Asia y del Pacífico los mayores consumidores, como se indica en la

Figura 3.

**Figura**

**3**

Demanda mundial de áridos para la construcción en 2015



*Nota. Tomado de Self-Compacting Concrete with incorporation of Recycled Concrete Aggregates (p.165) por (Kamaruddin et al., 2019).*

La extracción de estos recursos altera el entorno natural, ya que se elimina la capa superior del suelo y el subsuelo, además de un gran porcentaje de vegetación; esto a su vez resulta en la eliminación de cualquier hábitat natural existente en el sitio, así como la interrupción de los flujos de agua preexistentes.

De acuerdo con (Winfield & Taylor, 2005) los impactos en las aguas superficiales y subterráneas son una de las principales preocupaciones con respecto a las operaciones de extracción de áridos. La extracción de agregados cambia la pendiente del terreno y altera los patrones de drenaje del agua.

El ruido proveniente de las operaciones de extracción, y de carga y descarga de los materiales es otro tipo de contaminación generado por la explotación de canteras.

Como indica (Şanal, 2018), las emisiones de dióxido de carbono procedentes de los áridos para producción de hormigón incluyen el uso de explosivos para la voladura de reservas geológicas, y aunque estos se emplean en cantidades pequeñas, tienen altas emisiones específicas. El combustible utilizado por los vehículos en el sitio representa la mayor parte de las emisiones. La electricidad empleada en operaciones de trituración en una cantera contribuye a las emisiones indirectas, las cuales representan hasta el 70 % de las emisiones de la producción de áridos. En la Tabla 2 se indican las emisiones de CO<sub>2</sub> por tonelada de árido producido.

**Tabla 2**

Emisiones de CO<sub>2</sub> por tonelada de árido producido

| Actividad                                  | Fuente de energía | Energía            | Kg (CO <sub>2</sub> e/MJ) | Kg (CO <sub>2</sub> e/ton) |
|--|-------------------|--------------------|---------------------------|----------------------------|
| Explotación de canteras                    | ANFOc             | 0.045 <sup>a</sup> | 0.044                     | 0.002                      |
| Transporte en sitio                        | Diésel            | 26.41 <sup>a</sup> | 0.073                     | 1.928                      |
| Trituración, tamizado, clasificación       | Electricidad      | 28.80              | 0.119                     | 3.43                       |
| Transporte a sitio de construcción (50 km) | Diésel            | 38                 | 0.073                     | 2.774                      |
| <b>Total</b>                               |                   | <b>93.30</b>       | <b>0.309</b>              | <b>8.1</b>                 |

Partiendo del supuesto de que el gasóleo constituye el 99.9% de la energía y los explosivos son 0.1% durante la explotación de canteras.

Distancias típicas de transporte de materiales al sitio; la capacidad del camión es estimado en 25 t para el agregado.

ANFO - Combustible de nitrato de amonio.

*Nota.* Tomada de *Recycled aggregates in concrete production: engineering properties and environmental impact* (p.5) por (Meddah, 2017).

Citando el artículo (“Sand, Rarer than One Thinks,” 2014) los áridos se están extrayendo a un ritmo mucho mayor que su renovación, y la demanda de arena y grava como recursos terrestres es tan alta que se ha empezado a extraer áridos marinos y

costeros.

### **2.2.3 AGUA**

Se utilizó agua de la red pública de agua potable de Guayaquil, la cual cumple con los requerimientos indicados en NTE INEN 1855: “El agua de mezcla debe ser clara y de apariencia limpia, libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, álcalis, sales, materiales orgánicos y otras sustancias que puedan ser dañinas para el hormigón...” (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2016).

### **2.2.4 ADITIVOS**

Los aditivos son materiales que se adicionan a la mezcla de concreto para modificar sus propiedades recién mezcladas, de fraguado o de endurecimiento, o en estado endurecido (American Concrete Institute, 2022).

Se utilizó el aditivo Sikament-115, el cual es un aditivo superplastificante, reductor de agua de alto poder, compuesto por resinas sintéticas; su aspecto es de un líquido color café, y tiene una densidad aproximada de 1,200 kg/m<sup>3</sup>. Este producto está diseñado para cumplir con la norma ASTM C494, como aditivo Tipo A y F (Sika, 2017).

### **2.2.5 TEREFALATO DE POLIETILENO (PET)**

“El PET es un polímero termoplástico producido por polimerización de etilenglicol con ácido tereftálico” (Elias & Jurado, 2012). Este plástico es transparente, liviano, y cuenta con buenas propiedades como barrera al gas y a la humedad, dureza y resistencia al calor.

El PET se usa ampliamente para empacar alimentos y bebidas, especialmente refrescos, jugos y agua de tamaño conveniente. Prácticamente todas las botellas individuales y de 2 litros de refrescos carbonatados y agua que se venden en los EE. UU. están hechas de PET (PETRA, 2015).

(NAPCOR, 2022) afirma que en la actualidad el PET tiene una baja huella de carbono y que, si 200,000 personas reciclaran una botella de PET más al día, se eliminarían 2,168 toneladas de gases de efecto invernadero.

### **2.2.5.1 Obtención de PET reciclado**

En el presente trabajo se utilizó PET reciclado en forma de escamas (Figura 4) obtenido mediante reciclaje mecánico.

#### **Figura 4**

*Muestra de PET empleada en el presente trabajo*



De acuerdo con (Pilco, 2019), para el reciclaje de plástico PET en el Ecuador se utilizan máquinas de la compañía asociada Tritubot. Este proceso consiste en adquirir, pagar y triturar el plástico de las botellas en el interior de los equipos, por lo que se convierte de nuevo en materia prima.

### **2.2.5.2 Inclusión del PET en la industria de la construcción**

(Moya et al., 2018) incorporaron PET en la fabricación de ladrillos empleados en la construcción de muretes livianos, económicos y con resistencias que cumplen los parámetros permisibles de la NEC\_SE\_VIVIENDA. Esta es una alternativa sostenible que permite reciclar y reutilizar las botellas PET.

(Saucedo et al., 2021) indican que las fibras de PET pueden llegar a ser un gran aliado en la deflexión de elementos estructurales y aumento de la resistencia final a la tracción del concreto, donde la fibra es compatible como material óptimo de construcción hasta en un 4 % de su volumen total.

El plástico en la construcción es un material abundante, el 20% de los plásticos usados en Europa provienen de la industria de la construcción. Por esta razón incluir el uso de plástico llega a significar una reducción en costes de materiales y beneficios para el medio ambiente, con ideas claras se ha logrado concebir edificios distinguidos como

EFEEs (EcoArk en Taiwán) el cual cuenta con 1.5 Millones de botellas de PET que constituyen su fachada. (Seguí, 2023)

## 2.3 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

### 2.3.1 GRANULOMETRÍA

El ensayo para análisis de tamiz de agregados finos y gruesos se realiza para determinar la clasificación de materiales que tienen la finalidad de ser usados como agregados. Este ensayo se realiza de acuerdo con la norma ASTM C136 de (American Society for Testing and Materials, 2019a).

Para determinar si los agregados cumplen con los requisitos de granulometría para ser utilizados en mezclas de hormigón se aplica la norma ASTM C33/33M de (American Society for Testing and Materials, 2018).

### 2.3.2 DENSIDAD Y ABSORCIÓN

La densidad es el valor de la masa por unidad de volumen de un material. Como señala (American Society for Testing and Materials, 2022a) la absorción es el incremento en masa de los materiales ocasionada por la penetración de agua en los poros de las partículas en un periodo de tiempo determinado, excluyendo el agua adherida a la superficie externa de estas.

Este ensayo se realiza de acuerdo con la norma ASTM C128 de (American Society for Testing and Materials, 2022a), la cual especifica el uso de las siguientes fórmulas:

$$D_s = \frac{A}{(B + S - C)} \qquad D_{SSS} = \frac{S}{(B + S - C)}$$
$$D = \frac{A}{(A + B - C)} \qquad P_o = \frac{S - A}{A} \times 10$$

Donde:

A: Peso en el aire de la muestra secada al horno.

B: Peso del matraz lleno de agua hasta la marca de calibración.

S: Peso en el aire de la muestra en estado saturado superficialmente seco.



C: Peso del matraz con la muestra lleno de agua hasta la marca de calibración.

$D_S$ : Densidad de Volumen a 23°C del árido fino seco.

$D_{SSS}$ : Densidad de Volumen a 23°C del árido fino en estado saturado superficialmente seco.

D: Densidad aparente del árido fino a 23 °C.

$P_o$ : Porcentaje de absorción de agua del árido fino

## **2.4 ENSAYOS DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO**

### **2.4.1 REVENIMIENTO**

El concreto debe ser consistente y estable, para esto se necesita que los materiales se mezclen completamente hasta que parezca uniforme. La mezcla de cemento debe tener maniobrabilidad adecuada para un fácil posicionamiento; una vez que el concreto se ha endurecido debe cumplir con los requisitos de resistencia para soportar todas las diferentes necesidades a las que pueden y deben estar expuestos (Departamento de Mecánica Estructural, 2005).

La prueba de revenimiento descrita en ASTM C143, de (American Society for Testing and Materials, 2020), es el ensayo mayoritariamente aceptado para medir la consistencia del concreto.

El asentamiento es la distancia vertical del hundimiento del concreto medido con una precisión de 1/4" (5 mm); se usa una regla o flexómetro para medir desde la parte superior del cono descendente (forma) hasta el punto central originalmente desplazado del asentamiento del concreto, como se puede apreciar en la Figura 6. Un valor de asentamiento más alto indica un concreto más fluido.

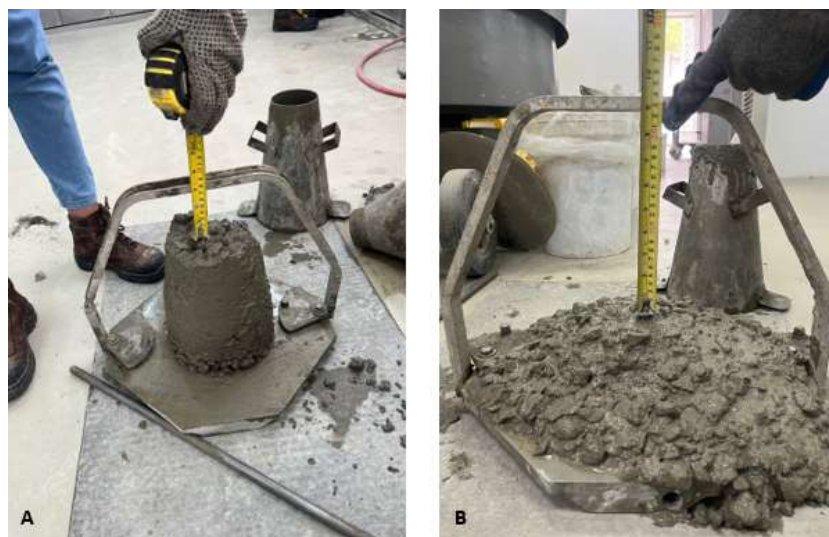
**Figura 5**

*Aparatos necesarios para realizar ensayo de revenimiento en el concreteo*



**Figura 6**

*Ensayo de revenimiento en el concreteo*



*Nota.* Figura A representa bajo asentamiento y Figura B representa alto asentamiento.

## 2.4.2 DENSIDAD Y CONTENIDO DE AIRE

La densidad (unidad de peso) y la fluidez del hormigón fresco se determinan según la norma ASTM C138 de (American Society for Testing and Materials, 2017a). Los resultados deben ser lo suficientemente precisos para determinar la cantidad volumétrica (rendimiento) de concreto producido por lote.

La prueba también puede proporcionar una indicación del contenido de aire, siempre que se conozca la gravedad específica de los ingredientes.

**Figura 7**

*Aparatos necesarios para realizar ensayos de densidad y contenido de aire*



**Figura 8**

*Ensayo para determinar la densidad en el concreto fresco*



## **2.5 ENSAYOS DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO**

### **2.5.1 COMPRESIÓN**

Los ensayos a compresión son realizados en base a la norma ASTM C39, de (American Society for Testing and Materials, 2021), la cual permite la determinación de la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto tales como cilindros moldeados y núcleos taladrados.

### **2.5.2 TRACCIÓN INDIRECTA**

Citando a (American Society for Testing and Materials, 2017b), este método de ensayo consiste en la aplicación de una fuerza de compresión diametral en el sentido longitudinal de una probeta cilíndrica de hormigón a una velocidad dentro de un rango establecido hasta que se produzca la falla; esta carga induce a los esfuerzos de tracción sobre el plano que contiene las cargas aplicadas.

Este ensayo se realiza de acuerdo con la norma ASTM C496 por (American Society for Testing and Materials, 2017b), la cual indica la siguiente fórmula para calcular la resistencia a la tracción por hendimiento de las probetas.

$$T = \frac{2P}{\pi ld}$$

donde:

T = resistencia a la tracción por hendimiento, psi (kPa)

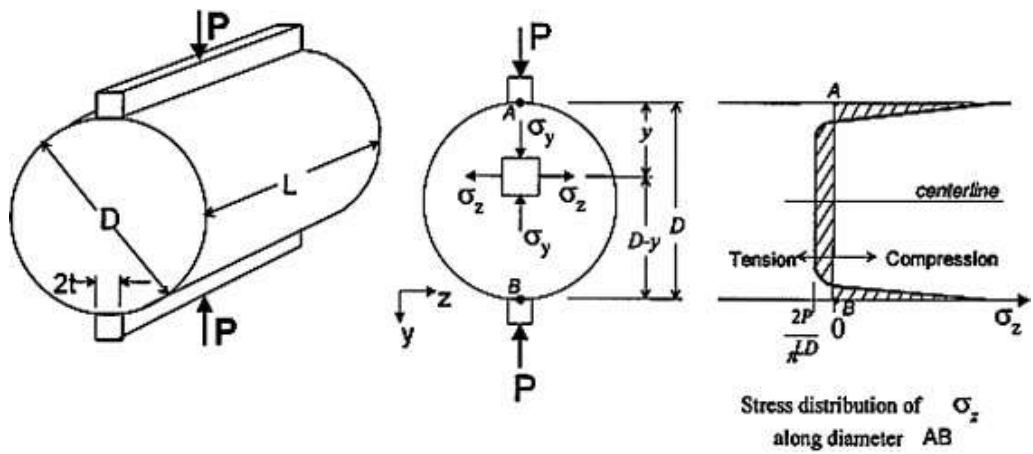
P = carga máxima aplicada señalada por la máquina de ensayo, lbf (kN)

l = longitud, pulg., (mm).

d = diámetro, pulg., (mm).

**Figura 9**

*Esquema de ensayo de tracción indirecta en cilindro de concreto*



*Nota.* Tomada de *The effect of concrete vertical construction joints on the modulus of rupture* (p.84) por (Gerges et al., 2015).

### 2.5.3 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DE IONES CLORUROS

De acuerdo con la norma ASTM C1202 de (American Society for Testing and Materials, 2022b), este método de prueba consiste en monitorear la cantidad de corriente eléctrica que pasa a través de porciones de núcleos de 50 mm de espesor o cilindros de 100 mm de diámetro nominal, durante un período de 6 horas.

Este ensayo se realiza en base a la norma ASTM C1202 de (American Society for Testing and Materials, 2022b), la cual indica que se debe ajustar el valor de carga total pasada mediante:

$$Q_s = Q_x \times \left(\frac{95}{x}\right)^2$$

Donde:

$Q_s$ : carga que pasa (culombios) a través de una muestra de 95 mm de diámetro.

$Q_x$ : carga pasada (culombios) a través de una muestra de x (mm) de diámetro.

x: diámetro (mm) de la muestra no estándar.

El objetivo de esta prueba es evaluar la capacidad del concreto para resistir la corrosión de los metales de refuerzo, lo que a su vez puede afectar la durabilidad y la vida útil del concreto. En general, una resistividad eléctrica más alta indica una mayor resistencia a la corrosión del concreto.

## **2.6 ELABORACIÓN DE PROBETAS**

En la norma ASTM C192, de (American Society for Testing and Materials, 2019b), se detallan los requerimientos para la preparación y curado de probetas para ensayo de hormigón en laboratorio bajo un control de calidad de los materiales, condiciones de ensayo, y usando hormigón que puede ser consolidado mediante apisonado o vibración.

### **2.6.1 MEZCLAS CONVENCIONALES DE HORMIGÓN**

De acuerdo con (Petroche, 2021), el hormigón de resistencia a la compresión de 28 MPa (280 kg/cm<sup>2</sup>) es el más utilizado, representando un 22.5% de la producción en Ecuador, y su uso es típico en la construcción de elementos estructurales como columnas, vigas y cimentaciones en edificaciones. También indica que para la construcción de losas comúnmente se utiliza el hormigón de 21 MPa representando un 20.1% de la producción en Ecuador.

La resistencia de 28 MPa es suficiente para soportar las cargas típicas de muchas estructuras, incluyendo edificios, viviendas, y estructuras públicas. Esta resistencia se puede lograr con una mezcla estándar de cemento, agregados y aditivos, convirtiéndola en una opción económica y de fácil acceso.

### **2.6.2 MEZCLAS DE HORMIGÓN MODIFICADAS CON PET**

Se establecieron porcentajes de sustitución de 5%, 10%, 15% y 20% del volumen del árido grueso en la mezcla de hormigón, por PET; estas proporciones fueron consideradas después de realizar una revisión de literatura.

En trabajos previos se realizaron sustituciones parciales en base volumétrica o en peso de los agregados finos y/o gruesos en diferentes proporciones, y se evaluaron las propiedades de las mezclas en estado fresco como la trabajabilidad, densidad y contenido de aire; así como las propiedades físicas y mecánicas en estado endurecido,

tales como la resistencia a la compresión, tracción y flexión, absorción de energía, y deformaciones. Estas investigaciones se describen en la Tabla 3, y los resultados correspondientes se exponen en la Tabla 4.

**Tabla 3***Revisión de literatura*

| REF. | Autor                    | Descripción/Producto   | País | Recolección de información   |
|------|--------------------------|--|------|--|
| 1    | (Kangavar et al., 2022)  | Hormigón compuesto por gránulos de PET como sustituto parcial o total de los áridos finos.         | AUS  | Experimentación directa y aplicación de ecuaciones de predicción de parámetros de resistencia. |
| 2    | (Bamigboye et al., 2022) | Hormigón compuesto por residuos de PET como sustituto parcial o total de los áridos gruesos.       | NG   | Experimentación directa.   |
| 3    | (Falih et al., 2022)     | Vigas de hormigón armado con contenido de partículas de residuos de PET como remplazo de la arena. | IRQ  | Experimentación directa y aplicación de ecuaciones para cálculo de rigidez.                    |
| 4    | (Dawood et al., 2021)    | Hormigón compuesto por residuos de PET como sustituto parcial de la arena natural.                 | IRQ  | Experimentación directa y fórmulas para cálculo de módulo de elasticidad.                      |
| 5    | (Rahmani et al., 2013)   | PET reciclado como sustituto de agregado fino en hormigón.   | IRN  | Experimentación directa.   |
| 6    | (Frigione, 2010)         | WPET como sustituto de agregados finos en hormigón.  | ITA  | Experimentación directa.   |
| 7    | (Irwan et al., 2013)     | Hormigón reforzado con fibras de PET reciclado.  | MYS  | Experimentación directa.   |



**Tabla 4***Resumen de resultados cuantitativos disponibles en la literatura*

| Referencia | Descripción del estudio   | Resultados del estudio  |
|------------|---|---|
| 1          | <p>Porcentajes de remplazo en volumen (<math>R</math>): 10%, 30% y 50%.</p> <p>Parámetros evaluados: Propiedades frescas, endurecidas y de microestructura del hormigón de grado 32.</p>  | <p><math>R \leq 10\%</math>: Se distribuyeron uniformemente de los gránulos.</p> <p><math>R &gt; 10\%</math>: Disminuyó la trabajabilidad, densidad y módulo de elasticidad.</p> <p><math>10\% &lt; R &lt; 32\%</math>: Se alcanzó la resistencia a la compresión prevista.</p>   |
| 2          | <p>Porcentajes de remplazo en volumen (<math>R</math>): 10%, 20%, 30%, 40%, 50% y 100%.</p> <p>Parámetros evaluados: Trabajabilidad, comportamiento mecánico, microestructural y térmico del hormigón.</p>  | <p><math>R = 20\%</math>: Se alcanzó la resistencia a la compresión prevista.</p> <p><math>R = 100\%</math>: Se obtuvo una forma relativamente irregular, con poros de 2 a 4 <math>\mu\text{m}</math>. La muestra soportó tres etapas de transición: Transición vítrea a 62.50°C, pico exotérmico a 194.76°C y pico endotérmico a 242.71°C.</p> |
| 3          | <p>Porcentajes de remplazo en peso (<math>R</math>): 5%, 7.5%, 10%, 12%, 15% y 20%.</p> <p>Parámetros evaluados: Carga de falla, deflexión máxima, absorción de energía, rigidez, índice de ductilidad, deformación por flexión, carga de primera fisura y patrón por fisura.</p> | <p><math>R = 20\%</math>: Incrementó la carga última de falla (4%), la deflexión máxima (93.70%), la absorción de energía (275.40%), el índice de ductilidad (91.37%) y la deformación por flexión (1139%). Disminuyó la rigidez inicial (38.44%) y la rigidez secante (46.40%).</p>  |
| 4          | <p>Porcentajes de remplazo en peso (<math>R</math>): 5%, 10%, 15% y 20%.</p> <p>Parámetros evaluados: Compresión, flexión, módulo de elasticidad, absorción de energía y deformación axial. Ensayos físicos de densidad, contracción y absorción.</p>                             | <p><math>R = 7.5\%</math>: Incrementó la resistencia a la compresión (43.64%), la resistencia a la tracción por división (26.97%) y la resistencia a la flexión (30.2%).</p>  |

|   |   |  |
|---|---|--|
|   |   | <p>10% &lt; <math>R</math> &lt; 12.5%: Se obtuvo el mayor incremento de la absorción de energía (108%).</p> <p><math>R = 20\%</math>: Disminuyó la trabajabilidad del hormigón (62.5%), el módulo de elasticidad (22.48%) y el aumento del tamaño (74.75%). Incrementó la tasa de absorción, y la deformación (76.7%).</p> |
| 5 | <p>Porcentajes de remplazo en volumen, (<math>R</math>): 5%, 10%, y 15%.</p> <p>Parámetros evaluados: Propiedades físicas de del concreto fresco.</p>           | <p><math>R = 10\%</math>: Se alcanzó la resistencia especificada.</p> <p><math>R \geq 15\%</math>: Disminuyó la resistencia a tracción hasta un 15.9% y 18% en los especímenes con relaciones de agua/cemento de 42% y 54%.</p>  |
| 6 | <p>Porcentajes de remplazo en peso, (<math>R</math>): 5%.</p> <p>Parámetros evaluados: Resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y ductilidad.</p> | <p>La resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción disminuyeron ligeramente, y la ductilidad amentó.</p>   |
| 7 | <p>Porcentajes de remplazo en volumen, (<math>R</math>): 0.5%, 1.0% y 1.5%.</p> <p>Parámetros evaluados: Propiedades mecánicas del hormigón.</p>                | <p><math>R = 0.5\%</math>: Aumentó la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad.</p>   |

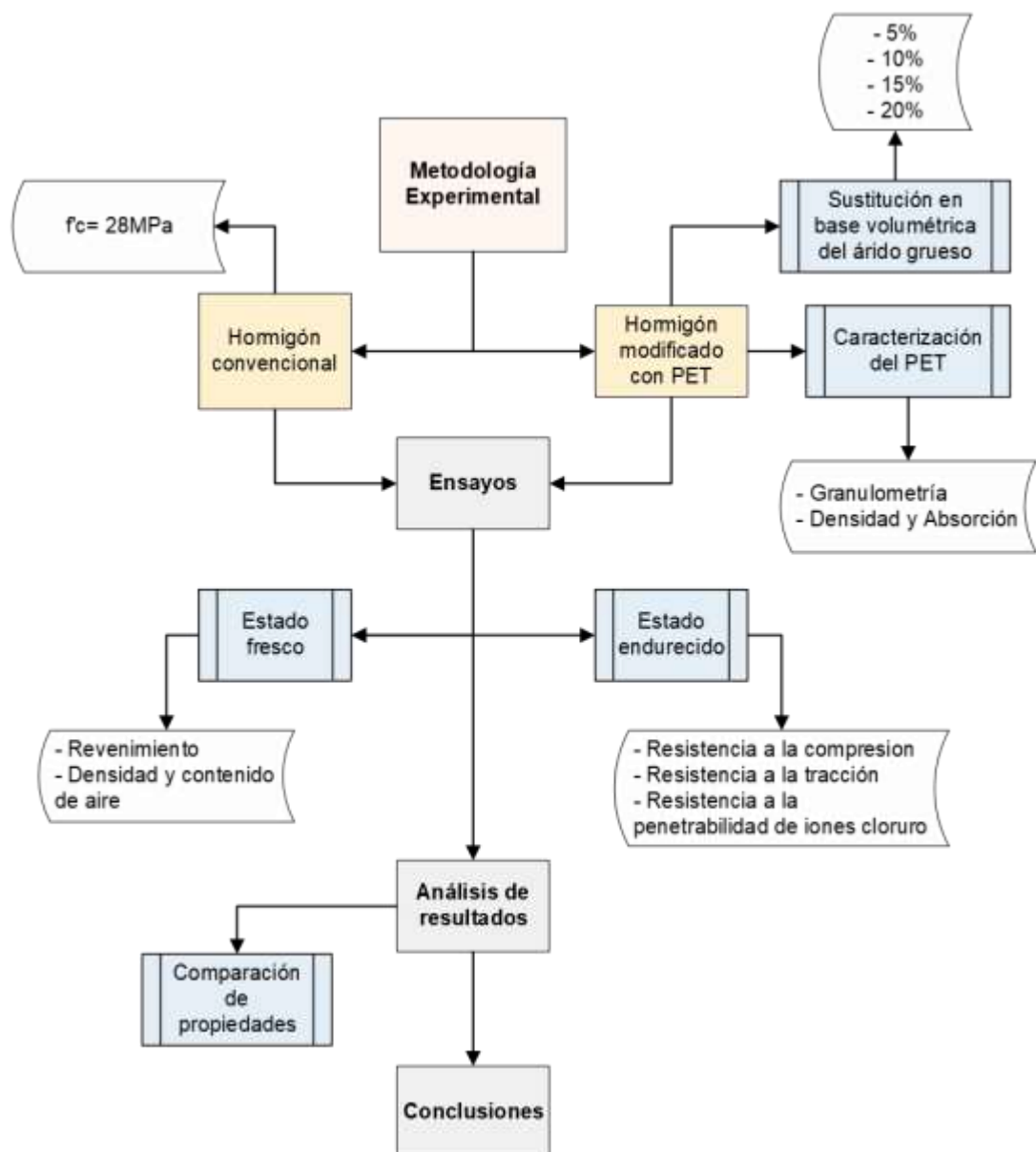
# CAPÍTULO III

## 3 MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se expone la metodología de trabajo realizada (Figura 10) para cumplir con los objetivos planteados en el Capítulo 1.

**Figura 10**

*Metodología del trabajo experimental*



### 3.1 CARACTERIZACIÓN DEL PLÁSTICO PET

#### 3.1.1 GRANULOMETRÍA

Se obtuvo la granulometría del PET triturado de acuerdo con las normas ASTM C33 e INEN 696. El tamizaje se realizó adoptando la norma ASTM C136.

Considerando el tamiz de 9.5 mm como máximo nominal, el ensayo debería realizarse con una muestra de 1kg; no obstante, debido a que el PET tiene baja densidad en comparación a un agregado grueso convencional, es decir que ocupa un mayor volumen en igual masa, se realizó el ensayo con una muestra de 500 g (Figura 11).

**Figura 11**

*Muestra de PET empleada para ensayo de granulometría*



Se realizó el tamizaje en una tamizadora mecánica durante un periodo de 10 minutos. Se pesó el material retenido en cada tamiz y se organizaron los resultados en la Tabla 5 para obtener la curva granulométrica del plástico PET.

**Figura 12**

*Proceso de tamizaje realizado en tamizadora mecánica*



**Resultados obtenidos**

**Tabla 5**

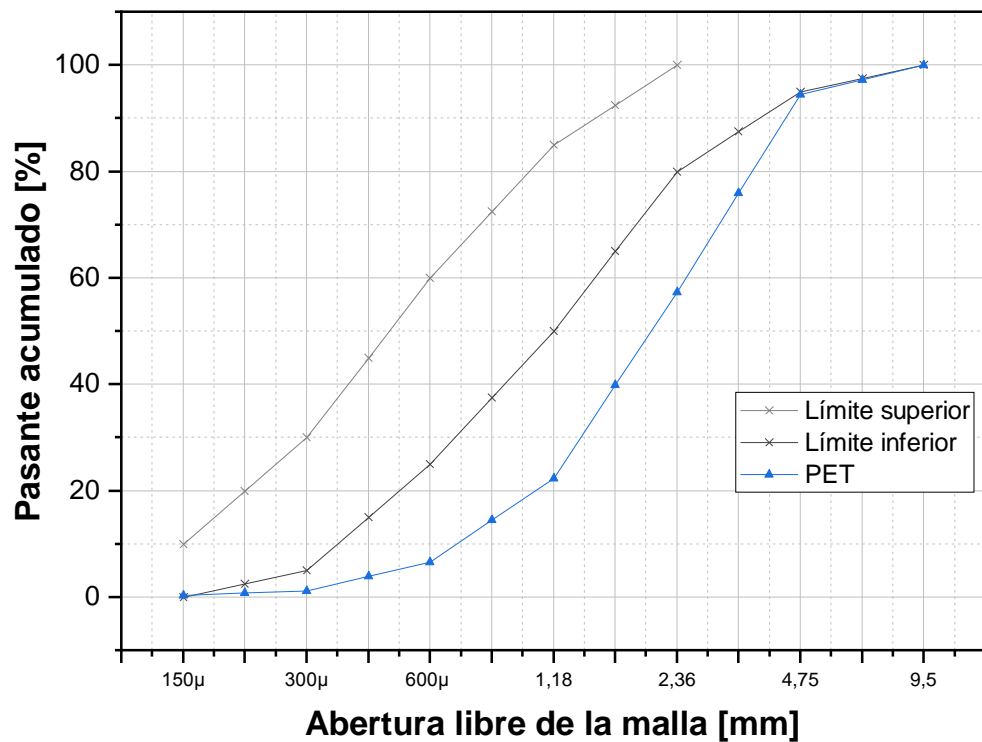
*Resultados de ensayo de granulometría de la muestra de PET como árido fino*

| Tamiz   |         | Retenido       | Retenido       | Retenido         | Retenido         | Pasante          |
|---------|---------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|
| INEN    | ASTM    | Parcial<br>(g) | Parcial<br>(%) | Acumulado<br>(g) | Acumulado<br>(%) | Acumulado<br>(%) |
| 9.50 mm | 3/8 in  | 0.00           | 0.00           | 0.00             | 0.00             | 100.00           |
| 4.75 mm | No. 4   | 27.70          | 5.54           | 27.70            | 5.54             | 94.46            |
| 2.36 mm | No. 8   | 185.40         | 37.08          | 213.10           | 42.62            | 57.38            |
| 1.18 mm | No. 16  | 174.90         | 34.98          | 388.00           | 77.60            | 22.40            |
| 600 µm  | No. 30  | 79.10          | 15.82          | 467.10           | 93.42            | 6.58             |
| 300 µm  | No. 50  | 26.90          | 5.38           | 494.00           | 98.80            | 1.20             |
| 150 µm  | No. 100 | 4.30           | 0.86           | 498.30           | 99.66            | 0.34             |
| BANDEJA |         | 1.70           | 0.34           | 500.00           | 100.00           | 0.00             |
| TOTAL   |         | 500.00         | 100.00         |                  |                  |                  |

En la Figura 13 se identificó que el material de PET no puede ser clasificado como agregado fino porque su curva granulométrica se encuentra fuera de los límites de graduación para este tipo de agregado. Se obtuvo un valor de módulo de finura de 4.2, lo que también indica que este material no puede ser clasificado como árido fino.

**Figura 13**

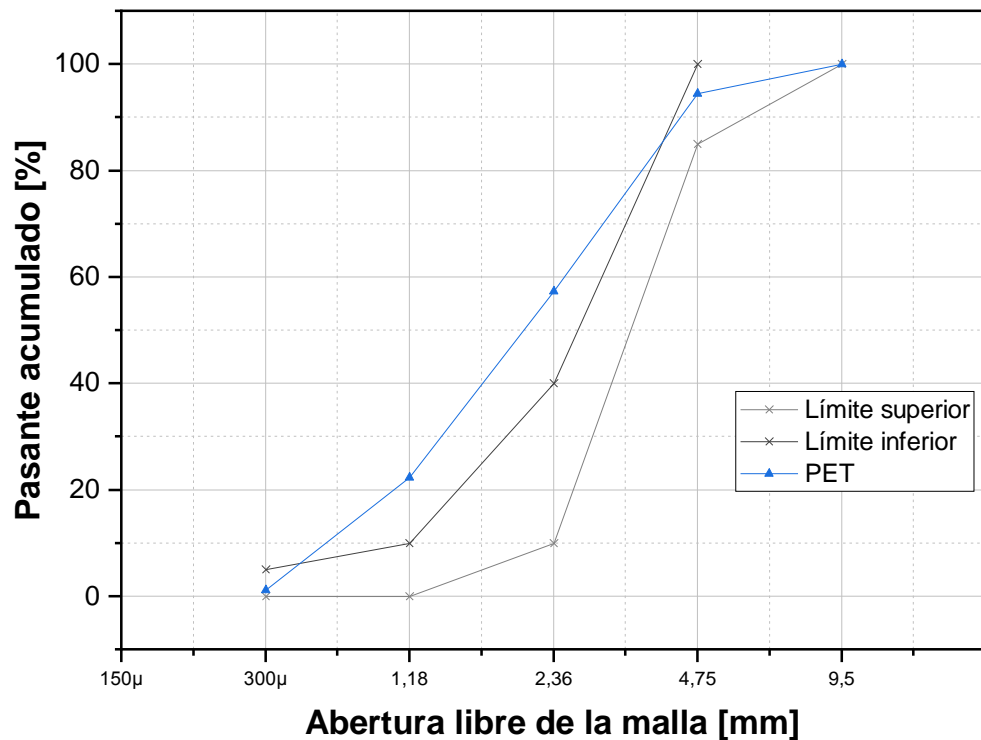
*Curva granulométrica de la muestra de PET y Límites de agregado fino*



Se identificó que la curva granulométrica del material tuvo una mayor cercanía a los límites del agregado de tamaño Nro. 9; sin embargo, la curva del material no está dentro de estos límites para ser clasificado en este tamaño como se observa en la Figura 14.

**Figura 14**

*Curva granulométrica de la muestra de PET y Límites de agregado Nro. 9*



Si bien es cierto que la muestra de PET no está dentro de los límites para agregados gruesos y finos, se puede observar que se adapta de mejor forma al árido de tamaño Nro. 9; por lo tanto, se considera que este material puede reemplazar en volumen al árido grueso, indicado en la Sección 2.2.2.

### **3.1.2 DENSIDAD Y ABSORCIÓN**

Se realizó el ensayo de densidad y absorción adaptando las normas ASTM C128 e INEN 856. La temperatura del medio en el que se realizó el ensayo era de aproximadamente 23°C.

Se consideró una muestra de plástico de 1 kg para inmersión en agua, de la cual se ocuparon 100 g para realizar el ensayo.

La muestra ensayada se llevó al horno durante varios días a una temperatura aproximada de 60°C. Aunque la norma indica secar la masa a una temperatura de 110 ± 5°C, se adoptó 60°C porque la temperatura de transición vítrea del PET, en donde el material se empieza a deformar, es aproximadamente 75°C de acuerdo con (Baker, 1999).

**Figura 15**

*Muestra de PET empleada para ensayo de densidad y absorción*



**Figura 16**

*Muestra de PET llevada al horno en ensayo de densidad y absorción*





## Resultados obtenidos

Aplicando las fórmulas descritas en la Sección 2.3.2 se obtuvieron los resultados indicados en la Tabla 6.

**Tabla 6**

*Resultados de ensayo de densidad y absorción*

| Datos      |         |                   |
|------------|---------|-------------------|
| A          | 86.08   | g                 |
| B          | 1273.76 | g                 |
| S          | 100.43  | g                 |
| C          | 1297.55 | g                 |
| Resultados |         |                   |
| Ds:        | 1123.20 | kg/m <sup>3</sup> |
| Dsss:      | 1310.40 | kg/m <sup>3</sup> |
| D:         | 1381.90 | kg/m <sup>3</sup> |
| Po:        | 16.70   | %                 |

La densidad de la muestra de PET tiene una diferencia de 69.60 kg/m<sup>3</sup> con respecto a la Dsss indicada en los ensayos de (Dawood et al., 2021), cuyo valor es igual a 1380 kg/m<sup>3</sup>. En términos de proporción, la Dsss de la muestra de PET corresponde al 94.95% de la Dsss indicada en la literatura.

## 3.2 ELABORACIÓN DE PROBETAS

### 3.2.1 DISEÑO DE MEZCLA PATRÓN

Se consideró un diseño ya definido y realizado mediante las especificaciones de ACI 211. La resistencia objetivo de este diseño es 280 kg/cm<sup>2</sup>, considerando lo indicado en la Sección 2.6.1, y se espera un asentamiento de 19 cm, es decir que la consistencia de la mezcla será fluida. Las dosificaciones del diseño patrón, para obtener una mezcla de 1 m<sup>3</sup>, se especifican en la Tabla 7. En la Tabla 8 se especifican las condiciones de los materiales.

**Tabla 7***Dosificación de materiales del diseño patrón para obtener una mezcla de 1 m<sup>3</sup>*

| Material               | Peso S.S.S. (kg) | Peso real (kg) |
|------------------------|------------------|----------------|
| Cemento HE             | 308.40           | 308.40         |
| Piedra Nro. 67         | 956.00           | 946.53         |
| Arena de río           | 1,010.60         | 1062.94        |
| Agua                   | -                | 123.34         |
| Aditivo Sikaplast N115 | -                | 4.01           |

*Nota.* La relación agua-cemento (a/c) de la mezcla es 0.54.

**Tabla 8***Condiciones de los materiales empleados en el diseño patrón*

| Material       | % Absorción | % Humedad |
|----------------|-------------|-----------|
| Cemento HE     | ...         | ...       |
| Piedra Nro. 67 | 1.00        | 0.00      |
| Arena de río   | 2.52        | 7.83      |

### 3.2.2 DISEÑO DE MEZCLAS MODIFICADAS CON PET

Para realizar el remplazo en volumen del agregado grueso por PET se siguió el siguiente procedimiento:

En los cálculos a continuación se considera el 5% de remplazo.

Paso 1: Se calcula el volumen de PET que reemplaza al agregado grueso, el cual se denotará como  $V_{PET}$ , y  $V_{ag}$  es el volumen del agregado grueso. Las densidades de los áridos se indicaron en la Sección 2.2.2.

$$V_{PET} = V_{ag} * \% \text{ Remplazo}$$

$$V_{PET} = \frac{m_{ag}}{\rho_{ag}} * \% \text{ Remplazo} = \frac{956}{2,846} * 5\% = 0.016 \text{ m}^3$$

Paso 2: Se calcula la masa del PET, denotado como  $m_{PET}$ . La densidad del PET se obtuvo en la Sección 2.3.2.

$$m_{PET} = V_{PET} * \rho_{PET} = 0.016 * 1,310 = 22.00 \text{ kg}$$

Paso 3: Se calcula la masa del agregado grueso después del remplazo, la cual se denotará como  $m'_{ag}$ .

$$m'_{ag} = m_{ag}(1 - \% \text{ Remplazo})$$

$$m'_{ag} = 956 * (1 - 5\%) = 908 \text{ kg}$$

Las masas del cemento, arena y aditivos se mantienen ya que el remplazo se realizó por volumen, es decir que el resto de materiales deben mantener las mismas proporciones para completar el  $m^3$  de mezcla. El peso del agua aumenta a medida que incrementa el porcentaje de remplazo porque se consideran las absorciones del PET y del árido remplazado.

Paso 4: Cálculo del peso de los áridos y PET.

En los siguientes cálculos se obtiene el peso del agregado grueso (piedra Nro. 67); estos pasos deben seguirse para obtener los pesos de los agregados y del PET.

Paso 4.1: Se calculan los pesos secos por  $m^3$  aplicando la fórmula:

$$W_s = \frac{W_{SSS}}{1 + \frac{\% \text{ Absorción}}{100\%}}$$

Donde:

$W_s$ : Peso seco por  $m^3$ .

$W_{SSS}$ : Peso saturado superficialmente seco por  $m^3$ .

$$W_s = \frac{908.00}{1 + \frac{1\%}{100\%}} = 899.01 \text{ kg}$$

Paso 4.2: Se calculan los pesos reales por m<sup>3</sup> aplicando la fórmula:

$$W_R = \frac{W_s}{1 + \frac{\% \text{ Humedad}}{100\%}}$$

Donde:

$W_s$ : Peso seco por m<sup>3</sup>.

$W_R$ : Peso real por m<sup>3</sup>.

$$W_R = \frac{899.01}{1 + \frac{0\%}{100\%}} = 899.01 \text{ kg}$$

Paso 5: Cálculo del peso del agua. Se realiza una sumatoria de las diferencias entre el peso saturado superficialmente seco del agregado y el peso real de este, y se aumenta el peso del agua obtenido mediante la relación a/c.

$$W_{R\_agua} = W_{agua} + \Sigma(W_{SSS} - W_R)$$

$$W_{R\_agua} = 166.22 + (908 - 899.01) + (1,010.60 - 1,062.94) + (22 - 18.85)$$

$$W_{R\_agua} = 126.01 \text{ kg}$$

Paso 6: Cálculo del peso del aditivo considerando 1.30% del peso del cemento.

$$\text{Peso del aditivo} = 1.30\% * \text{Peso del cemento} = 1.30\% * 308.40 = 4.01 \text{ kg}$$

Se obtuvieron las dosificaciones indicadas en la Tabla 9 para los diferentes porcentajes de remplazo.

**Tabla 9***Dosificaciones de mezclas de hormigón*

| Mix     | a/c  | Dosificación de mezclas de hormigón (kg/m <sup>3</sup> ) |                |              |       |             |
|---------|------|--|----------------|--------------|-------|-------------|
|         |      | Cemento  | Piedra Nro. 67 | Arena de río | PET   | Aditivo (%) |
| Patrón  | 0.54 | 308.4  | 946.53         | 1,062.94     | -     | 1.30        |
| PET 5%  | 0.54 | 308.4  | 899.01         | 1,062.94     | 18.85 | 1.30        |
| PET 10% | 0.54 | 308.4  | 851.49         | 1,062.94     | 37.7  | 1.30        |
| PET 15% | 0.54 | 308.4  | 804.95         | 1,062.94     | 56.56 | 1.30        |
| PET 20% | 0.54 | 308.4  | 757.43         | 1,062.94     | 75.41 | 1.30        |

**3.2.3 PROCESO DE MEZCLADO**

Previo al proceso de mezclado se pesaron los materiales según las dosificaciones determinadas en las Secciones 3.2.1 y 3.2.2.

En primer lugar, se humedeció la mezcladora mecánica para evitar que el cemento se adhiriera a las paredes de esta. Después se agregaron los materiales en el siguiente orden: áridos, cemento, agua y aditivo; en el caso de las mezclas modificadas con PET, el material se agregó después del cemento. Los tiempos de mezclado de cada material se indican en la Tabla 10, los cuales se consideraron con la finalidad de obtener una mezcla homogénea.

**Tabla 10***Tiempo de mezclado de los materiales para producir hormigón*

| Material                       | Tiempo de mezclado (minutos)           |
|--------------------------------|--|
| Áridos                         | 2                                      |
| Cemento                        | 2                                      |
| PET                            | 2                                      |
| 50% de Agua                    | 3                                      |
| 50% de Agua restante y aditivo | 2 o hasta obtener una mezcla homogénea |

### 3.2.4 MOLDEO Y CURADO

Las probetas se elaboraron de acuerdo con la norma ASTM C192. Se realizaron ocho probetas por mezcla de hormigón, las cuales se emplearon para realizar los ensayos de resistencia a la compresión y tracción, y resistencia a la penetración de iones cloruro.

**Figura 17**

*Elaboración de probetas de hormigón*



**Figura 18**

*Probetas de hormigón convencionales y modificadas con PET*



Las probetas se desencofraron después de 24 horas y se llevaron al cuarto de curado para permanecer en este durante 7 y 28 días hasta realizar el ensayo correspondiente.

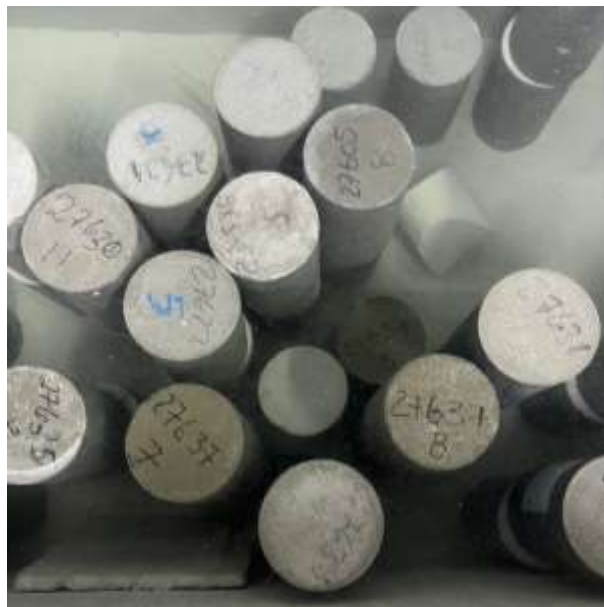
**Figura 19**

*Probetas de hormigón convencional y modificado con PET desencofradas*



**Figura 20**

*Curado de probetas de hormigón convencionales y modificadas con PET*



### 3.3 ENSAYOS DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

#### 3.3.1 REVENIMIENTO

Las mezclas de hormigón realizadas fueron ensayadas de acuerdo con la norma ASTM C143 para obtener sus revenimientos.

**Figura 21**

*Revenimiento obtenido en mezcla de hormigón modificada con 10% de PET*



#### 3.3.2 DENSIDAD Y CONTENIDO DE AIRE

Las mezclas de hormigón realizadas fueron ensayadas de acuerdo con la norma ASTM C138 para obtener la densidad y contenido de aire correspondiente.

Se utilizó un aparato medidor tipo B con cámara de aire horizontal y un recipiente con capacidad de 7.06 litros, como se observa en la Figura 22.

Las densidades se obtuvieron dividiendo la masa de la mezcla de hormigón para la capacidad del recipiente.



**Figura 22**

*Recipiente y cámara de aire utilizados para ensayo de densidad y contenido de aire en el hormigón*



**Figura 23**

*Medición de la masa de la mezcla de hormigón para obtener la densidad*



### 3.4 ENSAYOS DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO

#### 3.4.1 COMPRESIÓN

Los ensayos de resistencia a la compresión en las probetas de hormigón se realizaron a los 7 y 28 días porque se espera que para estas edades el hormigón alcance el 70% y 99% de su resistencia, respectivamente.

Este ensayo se realizó de acuerdo con lo indicado en la norma ASTM C39, y la resistencia se calculó aplicando  $P/A$ , donde  $P$  es la carga máxima soportada por el espécimen durante el ensayo y  $A$  área de la sección transversal promedio.

Se promedió las resistencias obtenidas en dos probetas ensayadas, verificando que los resultados estén dentro del rango de variación aceptable para dos resultados.

**Figura 24**

*Probeta de hormigón en prensa de ensayo de compresión*



**Figura 25**

*Placas de neopreno empleadas en ensayo de compresión de probetas de hormigón*



**Figura 26**

*Probetas de hormigón ensayadas a compresión a edad de 7 días*



*Nota.* De izquierda a derecha se muestran los especímenes con remplazo de 0%, 5%, 10% y 15%.

### 3.4.2 TRACCIÓN INDIRECTA

Los ensayos de resistencia a la tracción indirecta en las probetas de hormigón se realizaron a la edad de 28 días.

Este ensayo se realizó de acuerdo con lo indicado en la norma ASTM C496, y la resistencia se calculó aplicando la fórmula indicada en la Sección 2.5.2.

**Figura 27**

*Probeta de hormigón preparada para ensayo de tracción indirecta*



### 3.4.3 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DE IONES CLORUROS

Este ensayo se realizó aplicando la norma ASTM C1202 en especímenes con 28 días de curado y que han sido expuestos a iguales condiciones, por lo tanto, se puede realizar el análisis comparativo de los resultados.

Para obtener los resultados se utilizaron el Software y Hardware de Giatec Perma2; con este sistema se obtuvo una precisión de  $\pm 0.1$  mA y se realizó el registro en intervalos de 1 minuto.

**Figura 28**

*Pastillas de hormigón preparadas para realizar ensayo de resistencia a la penetración de iones cloruros*



**Figura 29**

*Acondicionamiento de muestras de hormigón en cámara de vacío previo al ensayo de resistencia a la penetración de iones cloruros*



**Figura 30**

*Muestras de hormigón sometidas a ensayo de resistencia a la penetración de iones cloruros*



## CAPÍTULO IV

### 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Tabla 11**

*Resultados de las propiedades físicas del hormigón en estado fresco y endurecido para distintas cantidades de PET*

| % de Reemplazo | Revenimiento (cm) | Aire (%) | Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Resistencia a compresión (MPa) | Tracción indirecta (MPa) | Ion cloruro |
|----------------|-------------------|----------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------|
| 0              | 19                | 1.4      | 2,478.75                      | 29.88                          | 3.30                     | 4,032.30    |
| 5              | 19                | 1.6      | 2,426.49                      | 25.70                          | 2.79                     | 4,276.70    |
| 10             | 12                | 2.2      | 2,419.83                      | 22.64                          | 2.53                     | 4,934.40    |
| 15             | 10                | 2.7      | 2,344.19                      | 20.57                          | 2.27                     | 5,208.70    |
| 20             | 7                 | 2.9      | 2,290.37                      | 18.84                          | 2.12                     | 5,241.30    |

#### 4.1 REVENIMIENTO

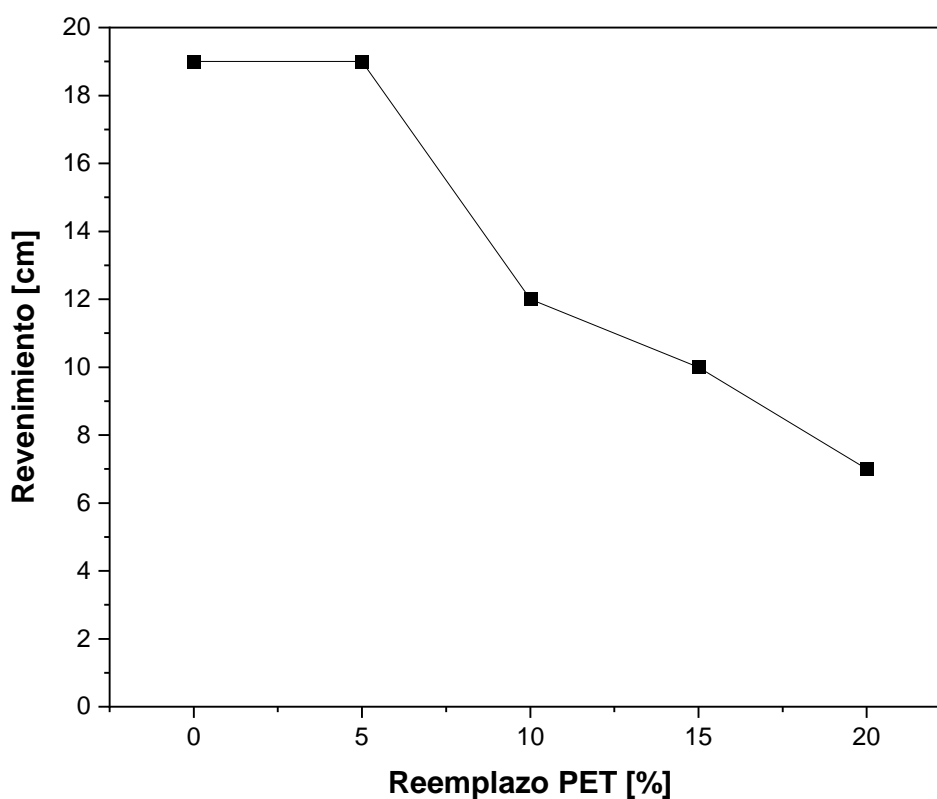
En los resultados presentados en la Figura 31 se observa que el remplazo de 5% por PET no causa efectos en el revenimiento del hormigón; sin embargo, al aumentar el porcentaje de remplazo se obtuvieron menores revenimientos, es decir que existe una disminución de la trabajabilidad. Estos resultados coinciden con los obtenidos por (Dawood et al., 2021), pero difieren del estudio realizado por (Bamigboye et al., 2022); esto se atribuye a que en el segundo caso se utilizaron residuos de PET pretratados.

Realizar un remplazo de 20% produce una disminución de 63.16% en la trabajabilidad; esta reducción se debe al tamaño de las partículas de PET y a su forma irregular, siendo escamosas y angulares, ya que estas características generan una mayor cantidad de vacíos en la mezcla y aumentan la resistencia a la deformación, por lo que se requiere de una mayor cantidad de pasta para alcanzar la trabajabilidad especificada. De igual forma, al ser partículas elongadas y aplanadas, y de menor gradación respecto a la del agregado que se está remplazando, tienen mayor superficie específica, por lo que existe mayor fricción entre partículas, contribuyendo a la disminución de la trabajabilidad.

Finalmente, la absorción del PET, con un valor de 16.70 % (Sección 3.1.2), es superior a la absorción de la piedra que es de 1.00% (Sección 3.2.1); es decir que las partículas de PET toman una mayor cantidad del agua de mezcla al saturarse, limitando la cantidad de agua restante para la formación de pasta de cemento y causando que las partículas de cemento estén más cercanas entre sí, por lo que se genera una mayor cohesión y en consecuencia disminuye la plasticidad del hormigón.

**Figura 31**

*Revenimiento en mezclas de hormigón para distintas cantidades de PET*



#### **4.2 DENSIDAD Y CONTENIDO DE AIRE**

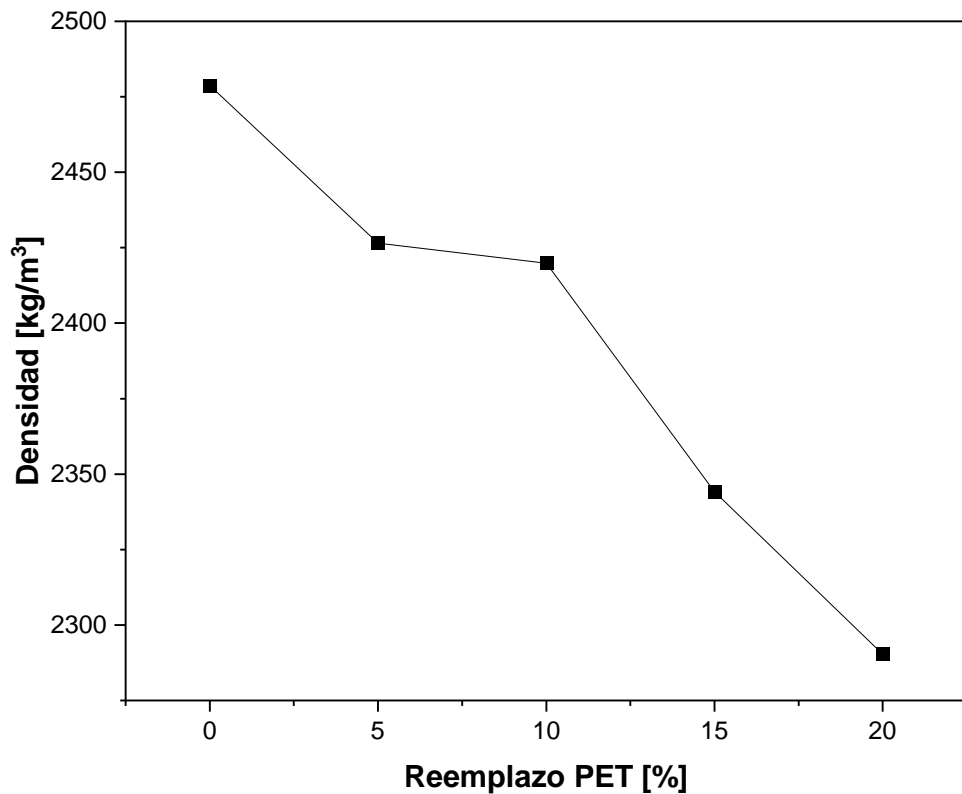
En la Figura 32 se observa que la densidad del hormigón en estado fresco disminuye al aumentar el porcentaje de PET, en donde porcentajes de reemplazo de 5% y 20% provocan disminuciones de 2.11% y 7.60% respectivamente. Esto se atribuye a que el PET tiene una baja densidad ( $1,310 \text{ kg/m}^3$ ), siendo 53.97% menor a la del árido grueso reemplazado ( $2,846 \text{ kg/m}^3$ ). Estos resultados tienen coherencia y están



respaldados por varias investigaciones, entre estas (Rahmani et al., 2013), (Dawood et al., 2021) y (Bamigboye et al., 2022).

**Figura 32**

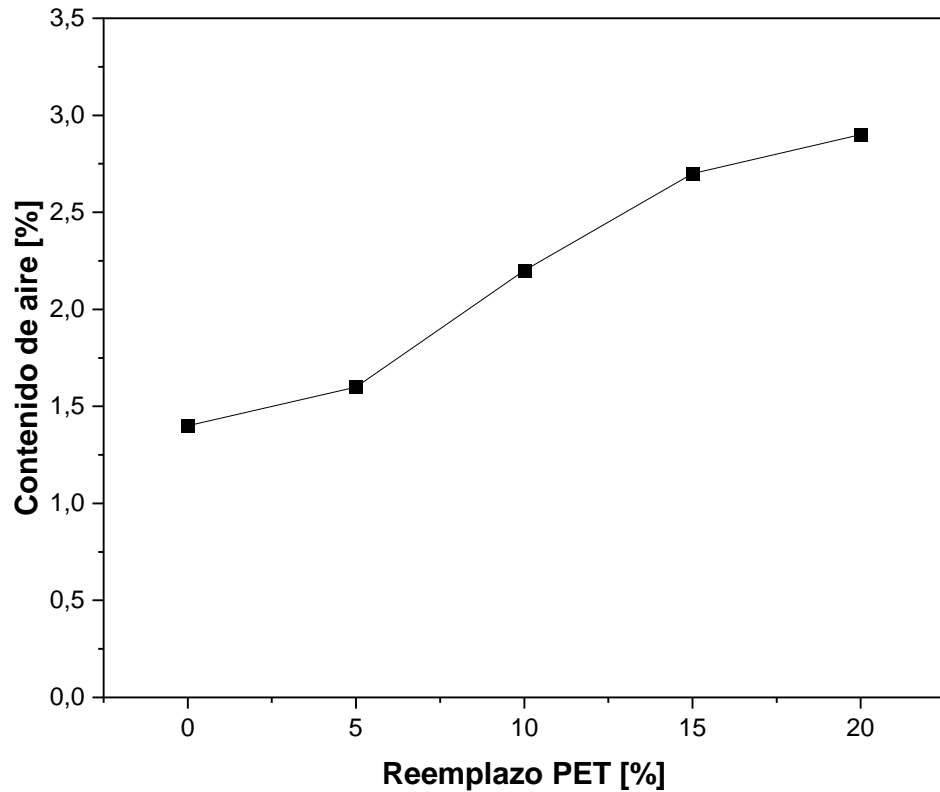
*Densidad en estado fresco de las mezclas de hormigón para distintas cantidades de PET*



Los resultados representados en la Figura 33 indican un incremento del contenido de aire conforme incrementa el porcentaje de reemplazo, en donde reemplazos del 5% y 20% generan incrementos del contenido de aire del 14.28% y 107.14% respectivamente. Este incremento se debe a las superficies porosas adicionales de las escamas de PET que pueden atrapar aire y aumentar el contenido de aire total, y a la baja densidad del plástico. Aunque existe un aumento del contenido de aire, los porcentajes se encuentran dentro de un rango aceptable.

**Figura 33**

*Contenido de aire en mezclas de hormigón para distintas cantidades de PET*



### **4.3 COMPRESIÓN**

En la Figura 34 se observa que la resistencia a la compresión del hormigón disminuye al aumentar el contenido de PET, de forma que las resistencias a los 28 días en las muestras de 5%, 10%, 15% y 20% tuvieron pérdidas en su resistencia del 14%, 24%, 31% y 37% respectivamente comparados a la muestra patrón.

La pérdida que existe en la resistencia se debe a la disminución del agregado grueso que aporta resistencia y también a que el contenido de aire es mayor a medida que el porcentaje de PET aumenta.

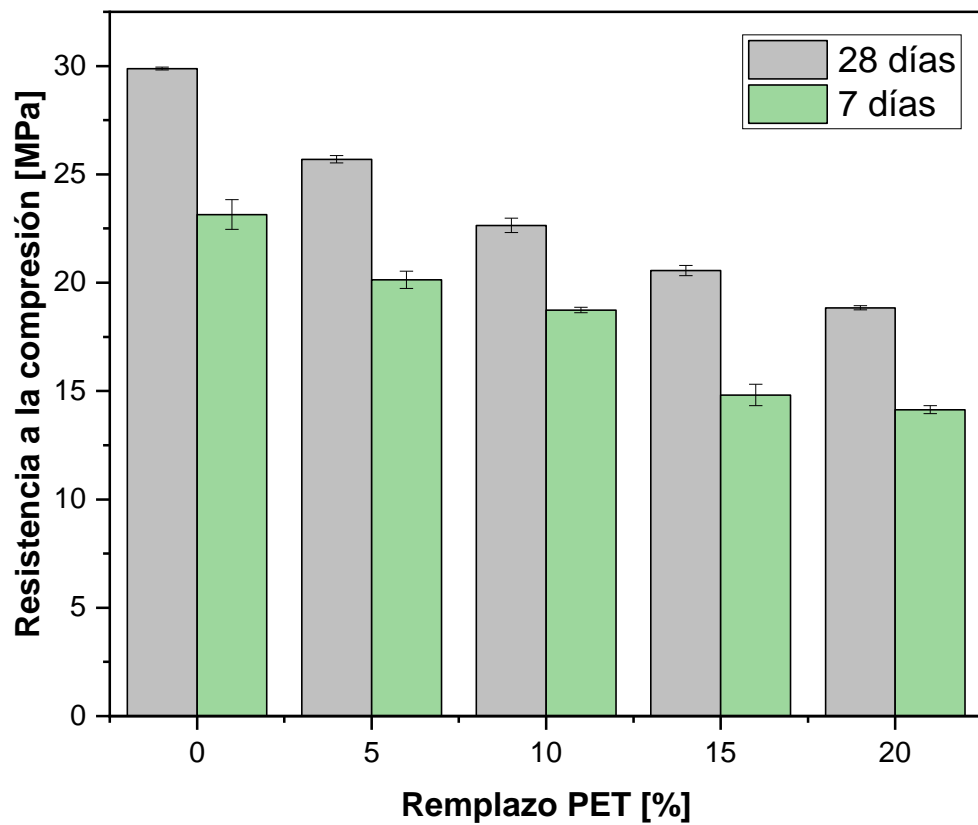
**Tabla 12**

*Resultados del ensayo de compresión a la edad de 28 días en las probetas de hormigón*

| % de Reemplazo | Esfuerzo de Rotura (MPa) |         |                  |
|----------------|--------------------------|---------|------------------|
|                | $f'c_1$                  | $f'c_2$ | $f'c_{promedio}$ |
| 0              | 29.83                    | 29.93   | 29.88            |
| 5              | 25.81                    | 25.58   | 25.70            |
| 10             | 22.88                    | 22.41   | 22.64            |
| 15             | 20.40                    | 20.73   | 20.57            |
| 20             | 18.91                    | 18.77   | 18.84            |

**Figura 34**

*Resistencia a la compresión en las probetas de hormigón a las edades de 7 y 28 días*



#### 4.4 TRACCIÓN INDIRECTA

El ensayo de tracción indirecta fue realizado únicamente a los 28 días de curado. Los resultados obtenidos se muestran en Figura 35 y la resistencia a la tracción se ve disminuida en todas las muestras que incluyen PET.

En la Figura 35 se observa que la resistencia a la tracción disminuye en relación con la muestra patrón en un 16%, 22%, 31% y 40% para las muestras PET5%, PET10%, PET15% y PET20% respectivamente.

Al igual que en la compresión, esta resistencia se ve afectada por la disminución del agregado grueso. Así mismo, la capacidad de adherencia del material PET dificulta la formación de una unión fuerte entre los materiales de la mezcla, lo que afecta a este tipo de esfuerzo.

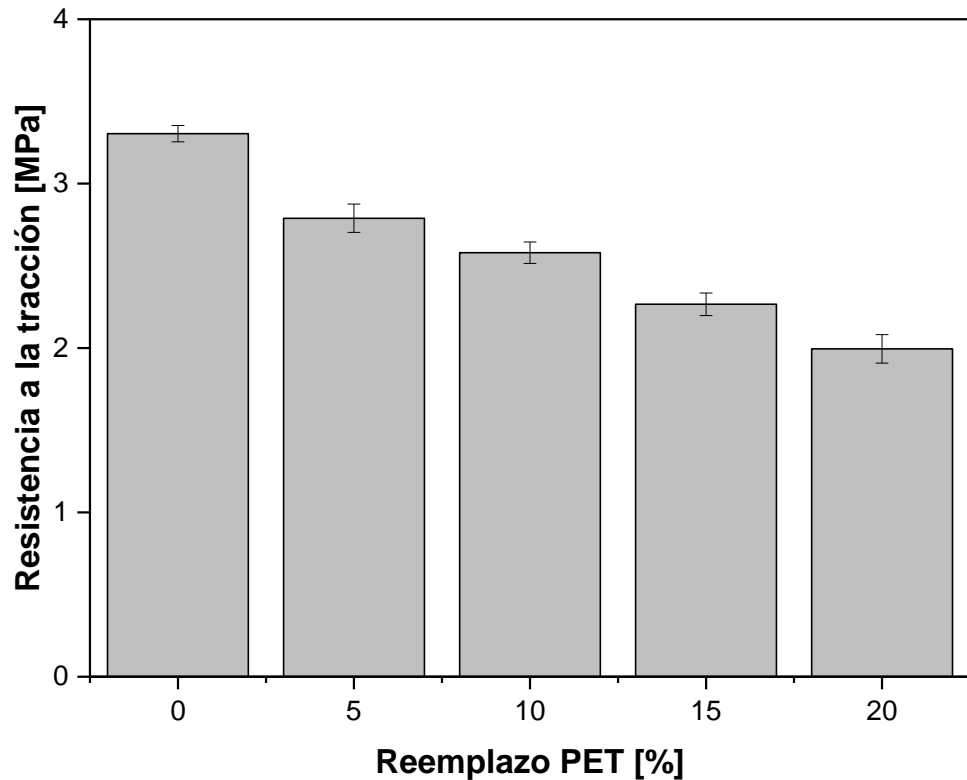
**Tabla 13**

*Resultados del ensayo de tracción indirecta en las probetas de hormigón*

| % de Reemplazo | Esfuerzo de Rotura (MPa) |          |                        |
|----------------|--------------------------|----------|------------------------|
|                | $f_{t1}$                 | $f_{t2}$ | $f_{t\text{promedio}}$ |
| 0              | 3.34                     | 3.27     | 3.30                   |
| 5              | 2.73                     | 2.85     | 2.79                   |
| 10             | 2.63                     | 2.53     | 2.58                   |
| 15             | 2.31                     | 2.22     | 2.27                   |
| 20             | 1.93                     | 2.06     | 1.99                   |

**Figura 35**

*Resistencia a la tracción indirecta en las probetas de hormigón a la edad de 28 días*



#### **4.5 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DE IONES CLORUROS**

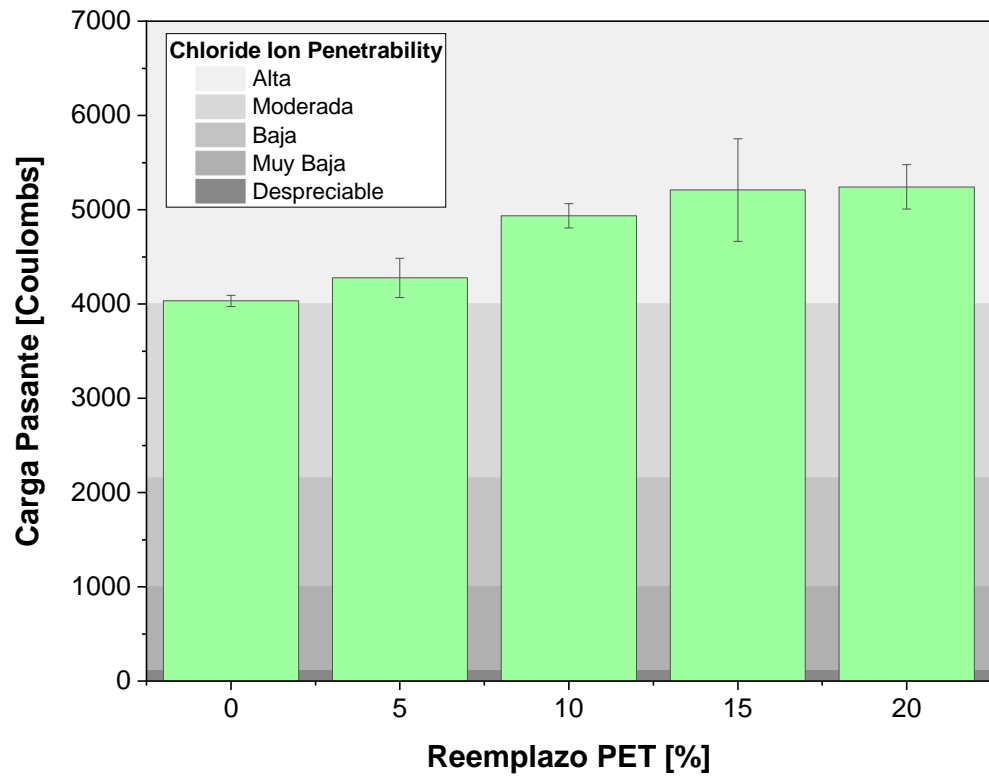
Utilizando la corriente medida para calcular la resistividad eléctrica del concreto se obtuvieron los resultados representados en la Figura 36. En la muestra patrón se obtuvo una carga pasante igual a 4,032.30 Columbus.

Al aumentar el porcentaje de PET existe un incremento de la carga pasante. Porcentajes de reemplazo de 5% y 20% causan aumentos de la carga pasante igual a 6.06% y 29.98% respectivamente; este fenómeno se atribuye a que el incremento del PET disminuye la densidad, por lo que aumenta la porosidad del hormigón. Sin embargo, todas las muestras se encuentran en la misma zona de penetrabilidad de iones cloruro, por lo que se concluye que la presencia de plástico PET, en las proporciones

ensayadas, no afecta las propiedades de durabilidad y resistencia a la penetrabilidad de iones cloruro del hormigón.

**Figura 36**

*Resistencia a la penetración de iones cloruros*



## CAPÍTULO V

### 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- El aumento del contenido de PET disminuye la trabajabilidad del hormigón. Este comportamiento está asociado a diferentes factores, entre estos la forma de las partículas de PET que por ser irregular provoca vacíos en la mezcla; así como su mayor superficie específica, en comparación con el árido grueso, que genera mayor fricción entre partículas. Otro factor es la propiedad de absorción del PET, que limita la cantidad de agua disponible para la formación de pasta resultando en una mezcla más seca y con mayor cohesión.
- El aumento del porcentaje de reemplazo de árido grueso por PET, disminuye la densidad del hormigón. Esta disminución se atribuye a la baja densidad del PET en comparación con el árido grueso.
- El contenido de aire incrementa a medida que aumenta el contenido de PET; esta relación se debe a las superficies porosas de las escamas de PET, que capturan el aire, y a la baja densidad del plástico.
- Los valores de resistencia a compresión disminuyen a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo con PET; esto debido a la disminución en el contenido de agregado grueso y al aumento de contenido de aire en el concreto.
- Los porcentajes de pérdidas en las resistencias a compresión y tracción son similares en cada una de las muestras con respecto al patrón.
- En el ensayo de resistencia a la penetrabilidad de iones cloruros se determinó que el incremento de PET causa un aumento de la permeabilidad del material; esto se relaciona con la disminución de la densidad que causa un incremento en la porosidad del material.
- Incorporar PET en la mezcla de hormigón tuvo impacto en todas sus propiedades, siendo la cantidad de aire la propiedad en estado fresco más afectada, y la resistencia a la compresión la propiedad en estado endurecido más afectada. Se concluye que el porcentaje de reemplazo de 5% es un porcentaje apropiado que puede aplicarse para modificar el hormigón y de esta manera reducir el uso de los áridos gruesos naturales, puesto que no causa un efecto significativo en las propiedades del hormigón que pueda afectar la calidad de este; además se obtiene

una resistencia mayor a 24 MPa, la cual es la resistencia mínima indicada en el ACI para fabricar elementos estructurales como muros exteriores, vigas y losas, siempre y cuando no estén en contacto directo con el suelo.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

- Realizar el procedimiento descrito en la presente investigación empleando escamas de PET con otras densidades y granulometrías, de preferencia muestras cuya curva granulométrica esté dentro de los límites granulométricos para aceptación de agregados gruesos que serán utilizados en el hormigón.
- Con relación al punto anterior, se recomienda experimentar el remplazo del árido fino, verificando que la muestra empleada esté dentro de los límites granulométricos de agregados finos que serán utilizados en el hormigón, para comparar los efectos de remplazar cada tipo de árido.
- Se recomienda realizar investigaciones empleando otras presentaciones de PET, como fibras o gránulos de otras características.
- Realizar ensayos a flexión para determinar los efectos de la incorporación de PET en este tipo de esfuerzo.
- Considerar la recomendación de ASTM C1202 para realizar el ensayo de penetrabilidad de iones cloruros a edades mínimas de 56 días.



## Bibliografía

- Alianza Global para Alternativas a la Incineración. (2021). *La basura plástica llegó a América Latina*.
- American Concrete Institute. (2022). *Admixture for Concrete*. [https://www.concrete.org/topicsinconcrete/topicdetail/admixture for concrete?search=admixture for concrete](https://www.concrete.org/topicsinconcrete/topicdetail/admixture%20for%20concrete?search=admixture%20for%20concrete)
- American Society for Testing and Materials. (2017a). ASTM C138/C138M Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. *ASTM INTERNATIONAL Standards Worldwide, 04.02*.
- American Society for Testing and Materials. (2017b). ASTM C496 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *ASTM INTERNATIONAL Standards Worldwide, 04.02*.
- American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM C33/C33M Standard Specification for Concrete Aggregates. *ASTM INTERNATIONAL Standards Worldwide, 04.02*. <https://doi.org/10.1520/C0033>
- American Society for Testing and Materials. (2019a). ASTM C136 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *ASTM INTERNATIONAL Standards Worldwide, 04.02*.
- American Society for Testing and Materials. (2019b). ASTM C192/C192M Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. *ASTM INTERNATIONAL Standards Worldwide, 04.02*.
- American Society for Testing and Materials. (2020). ASTM C143/C143M Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete. *ASTM INTERNATIONAL Standards Worldwide, 04.02*.
- American Society for Testing and Materials. (2021). ASTM C39/C39M Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *ASTM INTERNATIONAL Standards Worldwide, 04.02*.

- American Society for Testing and Materials. (2022a). ASTM C128 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. *ASTM INTERNATIONAL Standards Worldwide*, 04.02.
- American Society for Testing and Materials. (2022b). ASTM C1202 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. *ASTM INTERNATIONAL Standards Worldwide*, 04.02.
- Baker, A.-M. (1999). Thermoplastics. In C. Harper (Ed.), *Modern Plastics Handbook* (p. 48). McGraw-Hill.
- Bamigboye, G., Tarverdi, K., Adigun, D., Daniel, B., Okorie, U., & Adediran, J. (2022). An appraisal of the mechanical, microstructural, and thermal characteristics of concrete containing waste PET as coarse aggregate. *Cleaner Waste Systems*, 1, 100001. <https://doi.org/10.1016/J.CLWAS.2022.100001>
- Banco Mundial. (2021). *Población urbana - Ecuador*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL?end=2021&locations=EC&start=1960&view=chart>
- Banco Mundial. (2022, October). *Desarrollo urbano: Panorama general*.
- Dawood, A. O., AL-Khazraji, H., & Falih, R. S. (2021). Physical and mechanical properties of concrete containing PET wastes as a partial replacement for fine aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 14. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2020.E00482>
- Departamento de Mecánica Estructural. (2005). *Prueba de revenimiento* (Issue 01). <https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoConcretoFresco/REVENIMIENTO.pdf>
- Elias, X., & Jurado, L. (2012). Los plásticos residuales y sus posibilidades de valoración. In X. Elias (Ed.), *Reciclaje de Residuos Industriales* (2nd ed.). Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- Falih, R. S., Dawood, A. O., & Al-Khazraji, H. (2022). Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams Containing PET Waste Particles as Sand

- Replacement. *Civil and Environmental Engineering*, 18(1), 209–220.  
<https://doi.org/10.2478/CEE-2022-0020>
- Frigione, M. (2010). Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 30(6), 1101–1106.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.030>
- Gerges, N. N., Issa, C. A., & Fawaz, S. (2015). Effect of construction joints on the splitting tensile strength of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 3, 83–91. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2015.07.001>
- Holcim. (2022). *Ficha Técnica - Cemento Holcim Premium*.  
<https://www.holcim.com/ec/cemento-holcim-premium>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2016). Norma Técnica Ecuatoriana Hormigones. Hormigón Premezclado. Requisitos. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 1855, 27. [www.inen.gob.ec](http://www.inen.gob.ec)
- Irwan, J. M., Asyraf, R. M., Othman, N., Koh, H. B., Annas, M. M. K., & Faisal, S. K. (2013). The mechanical properties of PET fiber reinforced concrete from recycled bottle wastes. *Advanced Materials Research*, 795, 347–351.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.795.347>
- Kamaruddin, S., Goh, W. I., Jhatial, A. A., Mohd Zuki, S. S., & Faiz, A. (2019). Self-Compacting concrete with incorporation of recycled concrete aggregates. *International Journal of Integrated Engineering*, 11(9 Special Issue), 164–173.
- Kangavar, M. E., Lokuge, W., Manalo, A., Karunasena, W., & Frigione, M. (2022). Investigation on the properties of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) granules as fine aggregate replacement. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00934.  
<https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E00934>
- Kosmatka, Steven H.; Wilson, M. L. (2003). Design and Control of Concrete Mixtures. In *Portland Cement Association* (Vol. 2003, Issue 9).  
<https://doi.org/10.1155/S0161171203110277>

- Meddah, M. S. (2017). *Recycled aggregates in concrete production : engineering properties and environmental impact*. 05021, 1–8.
- Moya, J., Cevallos, E., & Endara, E. (2018). *La construcción sostenible a partir del empleo de ladrillos tipo PET*. 24–32.
- NAPCOR. (2022). *Debunking PET Myths*. <https://positivelypet.org/myths-and-facts/>
- Neville, A. (2013). *Tecnología del concreto*. Editorial A. Soledad Moliné Venanzi.
- PETRA. (2015). *An Introduction to PET*. [http://www.petresin.org/news\\_introttoPET.asp](http://www.petresin.org/news_introttoPET.asp)
- Petroche, D. (2021). *Desempeño Ambiental del Cemento y del Concreto en el Ecuador: Una puerta a la Construcción Sostenible*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Pilco, I. (2019, May 16). *Tritubot y el Día Mundial del Reciclaje*. <https://www.muchohomejorecuador.org.ec/tritubot-y-el-dia-mundial-del-reciclaje/>
- Plastipak. (2022). *La historia del plástico PET*. Reciclar Cuenta! <https://es.recyclingcounts.com/2021/08/26/la-historia-del-plastico-pet/>
- Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M. H. A., Allahyari, H., & Nikbin, I. M. (2013). On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*, 47, 1302–1308. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041>
- Şanal, İ. (2018). Significance of Concrete Production in Terms of Carbondioxide Emissions: Social and Environmental Impacts. *Journal of Polytechnic*, 0900(2), 369–378. <https://doi.org/10.2339/politeknik.389590>
- Sand, rarer than one thinks. (2014). *Environmental Development*, 11, 208–218. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2014.04.001>
- Saucedo, J., Atoche, J., & Muñoz, S. (2021). Uso de los agregados PET en la elaboración del concreto: Revisión de la literatura. *Avances Investigación En*

*Ingeniería*, 18(2). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/AVANCES.2.6942>

Seguí, P. (2023, February 12). *Los plásticos en la arquitectura moderna. Una opción para recordar*. OVACEN. <https://ovacen.com/el-plastico-en-la-arquitectura-moderna/>

Sika. (2017). *Hoja Técnica de Producto Sikament-115*.

Solíz, M., Lema, A., & Enríquez, D. (2022). *Boletín de Prensa - Ecuador sigue importando miles de toneladas de desechos plásticos, sobre todo desde EEUU*.

Winfield, Mark. & Taylor, Amy. (2005). *Rebalancing the load : the need for an aggregates conservation strategy for Ontario* (Gibson Library Conections, Ed.). Pembina Institute for Appropriate Development.



## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Giler Bollorino Paolo Abel**, con C.C: **1311611659**, y **García González Zoila Paulette**, con C.C: **0804517423** autores del trabajo de titulación: **Desempeño físico del concreto con PET reciclado en el Ecuador**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaramos tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizamos a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 24 de febrero del 2023

### LOS AUTORES:

f. \_\_\_\_\_

Nombre: **Giler Bollorino Paolo Abel**  
C.C: **1311611659**

f. \_\_\_\_\_

Nombre: **García González Zoila Paulette**  
C.C: **0804517423**

## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

|   |  |  |    |
|---|--|--|----|
| <b>TEMA Y SUBTEMA:</b>  | <b>Desempeño físico del concreto con PET reciclado en el Ecuador.</b>  |  |    |
| <b>AUTOR(ES)</b>  | Zoila Paulette García González; Paolo Abel Giler Bollorino   |  |    |
| <b>REVISOR/TUTOR</b>  | Stefany Esther, Alcívar Bastidas   |  |    |
| <b>INSTITUCIÓN:</b>   | Universidad Católica de Santiago de Guayaquil  |  |    |
| <b>FACULTAD:</b>  | Facultad de Ingeniería   |  |    |
| <b>CARRERA:</b>   | Ingeniería Civil   |  |    |
| <b>TÍTULO OBTENIDO:</b>   | Ingeniero/a civil  |  |    |
| <b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>                                      | 24 de febrero del 2023   | <b>No. DE PÁGINAS:</b>   | 59 |
| <b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>   | Ingeniería, Ingeniería en Materiales, Sostenibilidad.  |  |    |
| <b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>                                 | Hormigón, Residuos de Tereftalato de Polietileno, Propiedades Mecánicas del Hormigón, Resistencia a la Compresión, Permeabilidad del Hormigón, Ion Cloruro.  |  |    |
| <b>RESUMEN:</b>   | <p>El presente trabajo estudia los efectos de incorporar PET triturado, como sustituto parcial del árido grueso, en las propiedades frescas y endurecidas de una mezcla convencional de hormigón con resistencia especificada de 28 MPa. Para esto se realizaron remplazos en base volumétrica en proporciones de 5%, 10%, 15% y 20% del árido grueso, y se realizaron ensayos de trabajabilidad, densidad, contenido de aire, y de resistencia a la compresión, tracción y penetrabilidad de iones cloruros, tanto en la mezcla patrón como en las mezclas modificadas, aplicando los estándares de ASTM. Los resultados demuestran que la trabajabilidad disminuyó al aumentar PET en porcentajes mayores a 5%; sin embargo, su consistencia se mantuvo plástica. El contenido de aire también aumentó al incorporar PET, en donde un remplazo de 20% generó un incremento de 107.14%. La densidad fresca no fue tan afectada, siendo 7.60% el máximo decremento. La resistencia a la compresión a los 28 días disminuyó al aumentar el porcentaje de PET, en donde los remplazos de 5%, 10%, 15% y 20% provocaron pérdidas de 14%, 24%, 31% y 37% respectivamente. Las pérdidas en la resistencia a la tracción siguen una tendencia similar a la anterior, con valores de 16%, 22%, 31% y 40% respectivamente. Finalmente, al aumentar el contenido de PET aumenta la permeabilidad del concreto, en donde remplazos de 5% y 20% causan aumentos de la carga eléctrica pasante igual a 6.06% y 29.98% respectivamente.</p> |  |    |
| <b>ADJUNTO PDF:</b>   | <input checked="" type="checkbox"/> SI   | <input type="checkbox"/> NO                                      |    |
| <b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>                                     | <b>Teléfono:</b> +593-962886235<br>+593-958986586  | <b>E-mail:</b> zoilapgarciag06@gmail.com<br>pabelgiler@gmail.com |    |
| <b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):</b> | <b>Nombre:</b> Clara Glas Cevallos<br><b>Teléfono:</b> +593-984616792<br><b>E-mail:</b> clara.glas@cu.ucsg.edu.ec  |  |    |
| <b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>                             |  |  |    |
| <b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>                         |  |  |    |
| <b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>                                      |  |  |    |
| <b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>                           |  |  |    |