

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA CIVIL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIEROS CIVILES**

**TEMA:  
ELABORACIÓN DE UN HORMIGÓN POLIMÉRICO APROVECHANDO  
RESIDUOS DE LA TRITURACIÓN DE PLACAS ELECTRÓNICAS**

**AUTORES:  
NARVAEZ ALVAREZ ANGEL SEBASTIAN  
VELASQUEZ AULESTIA DJALMAR JOEL**

**TUTORA:  
LUCERO MARISOL SERRATO ARIAS.**

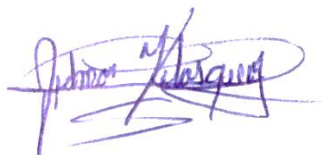
**Quito, mayo del 2021**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros NARVAEZ ALVAREZ ANGEL SEBASTIAN y VELASQUEZ AULESTIA DJALMAR JOEL, con documento/s de identificación N° 1717946378 y N° 1723944474, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: ELABORACIÓN DE UN HORMIGÓN POLIMÉRICO APROVECHANDO RESIDUOS DE LA TRITURACIÓN DE PLACAS ELECTRÓNICAS, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, mayo del 2021



.....

.....

NARVAEZ ALVAREZ ANGEL SEBASTIAN

VELASQUEZ AULESTIA DJALMAR JOEL

CI: 1717946378

CI: 1723944474

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo Académico, ELABORACIÓN DE UN HORMIGÓN POLIMÉRICO APROVECHANDO RESIDUOS DE LA TRITURACIÓN DE PLACAS ELECTRÓNICAS, realizado por NARVAEZ ALVAREZ ANGEL SEBASTIAN y VELASQUEZ AULESTIA DJALMAR JOEL, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, mayo del 2021

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'LMA', with a large 'X' mark below it.

Firma

LUCERO MARISOL SERRATO ARIAS

CI: 1757028897

# ELABORACIÓN DE UN HORMIGÓN POLIMÉRICO APROVECHANDO RESIDUOS DE LA TRITURACIÓN DE PLACAS ELECTRÓNICAS

## MANUFACTURING OF A POLYMERIC CONCRETE USING SHREDDED ELECTRONIC BOARDS WASTE

Angel Narvaez- Alvarez<sup>1</sup>, Djalmar Velásquez -Aulestia<sup>2</sup>, Lucero Marisol- Serrato<sup>3</sup>.

### Resumen

El presente artículo tiene el objetivo de presentar la elaboración de un hormigón polimérico para el cual se utilizaron los siguientes materiales de la región: resina de poliéster (con sus respectivos aditivos), agregados pétreos de la cantera de Pifo y residuo de trituración de placas electrónicas, como reemplazo parcial de la resina y también para disminuir la contaminación generada por este subproducto. Para lograrlo, se realizaron cinco diseños de mezcla por el método de densidad óptima en los cuales, se mantenía fija la proporción de agregado pétreo mientras se variaban las masas de resina (con sus aditivos) y residuo PCB, este residuo era incrementado en un 0 (estándar), 5, 10, 15 y 20% en sustitución de la resina. Probetas de cada mezcla fueron ensayadas a compresión a 1, 3 y 7 días y otras probetas fueron ensayadas a flexión. Se concluye que el mejor desempeño se obtuvo en la mezcla en la cual el 5% de la resina era sustituida por residuo PCB, pues se alcanzaron casi 100 MPa de resistencia a compresión y 23.4 MPa de resistencia a flexión.

**Palabras Clave:** resina de poliéster, hormigón polimérico, residuo PCB

### Abstract

The aim of this research is to describe the manufacturing of a polymeric concrete using regional materials such as: polyester resin (and its chemical admixtures), stone aggregates from Pifo's quarry, shredded electronic boards waste, this last one as partial replacement of resin and also for reducing the environmental impact of this waste. In order to accomplish it, five polymeric concrete mixtures were developed by the optimal density method, in which proportion of stone aggregates were fixed while resin mass (with its chemical admixtures) and PCB waste were changed by increasing in 0 (std), 5, 10, 15 and 20% of PCB waste in replacement of resin. Cylindrical samples were tested for compressive strength at ages of 1, 3 and 7 days and other prismatic samples of polymeric concrete were tested for flexural strength. In conclusion, the best mechanical performance was reached by the mixture with 5% of waste replacing resin, which developed almost 100 MPa of compressive strength and 23.4 MPa of flexural strength.

**Keywords:** polyester resin, polymer concrete, shredded electronic waste.

---

<sup>1</sup> Estudiante Carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana Quito, Sede Quito – Ecuador

<sup>2</sup> Estudiante Carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana Quito, Sede Quito – Ecuador

<sup>3</sup> Autores para correspondencia ✉: dvelasqueza@est.ups.edu.ec-✉: anarvaeza@est.ups.edu.ec

## 1. Introducción

En la actualidad la generación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) es una problemática mundial debido a que las personas usan estos dispositivos para sus labores cotidianas y la obsolescencia de los mismos tiene consecuencias como las registradas en el año 2019 donde se generaron más de 53.6 millones de toneladas de desechos electrónicos aproximadamente [1]. En el Ecuador se ha incrementado el consumo de los aparatos electrónicos debido a la aceleración de la tecnología. Esto ha producido desechos RAAE de alrededor de 5,5 kg/habitante llegando a cifras en el año 2016 de 90.000 toneladas [2], Una parte fundamental de estos residuos son las placas de circuitos impresos (PCB).

Las placas de circuitos impresos son la base de la industria electrónica, siendo su producción crucial para la fabricación y venta de más de un billón de equipos electrónicos al año [3].

Las placas de circuitos impresos son una mezcla compleja de fibra de vidrio, resina epóxica y múltiples tipos de metales. Las partes metálicas son rentables para el reciclaje y representan el 20% de la placa. El 80% restante está conformado por fibra de vidrio en porcentajes de 67.22% a 78.8% y resina epóxica en valores de 21,22% a 32.78% [4]. Estos materiales no son reciclables.

Debido a estos datos, surge la necesidad de dar una disposición final a dichos residuos, ya que generan contaminación ambiental en grandes cantidades. Además traen consecuencias en el ser humano como: irritación de los ojos y piel conocida como “comezón de lana de vidrio”, irritación a las vías respiratorias y partes del pulmón [5].

El concreto u hormigón polimérico (CP) es un material compuesto de agregados minerales y resina. Esta resina es activada con un iniciador que se añade a la mezcla, comenzando así el proceso de curado o endurecimiento. Las ventajas de este concreto son: la de mejorar sus

propiedades mecánicas y físicas como altas resistencias en cortos tiempos de fraguado, resistencia al deshielo y resistencia a corrosivos del entorno [6], además este CP es más ligero que el hormigón tradicional de cemento portland, y más fuerte [7], siendo por estas razones, una gran ventaja para ser usado en la producción de prefabricados. Una de las grandes desventajas que presenta este hormigón polimérico, es la falta de información sobre sus propiedades, además del alto costo de la resina la cual es su componente principal.

## 2. Materiales y Métodos

En el presente artículo se describe la elaboración de un CP al cual se le incluyó residuo de trituración de PCBs como sustituto parcial de la masa resina en porcentajes del 5%, 10%,15% y 20%, además del resto de materiales convencionales de un hormigón polimérico como lo son agregados finos, gruesos y resina (en este caso, poliéster).

Los ensayos realizados en laboratorio se ejecutaron cumpliendo las normas que se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Ensayos de caracterización de los materiales

| Ensayo                                   | Norma Ecuatoriana | Norma Internacional |
|--|-------------------|---------------------|
| <b>Análisis Granulométrico</b>           | NTE<br>INEN 696   | ASTM C-136          |
| <b>Densidad y absorción de árido</b>     | NTE<br>INEN 856   | ASTM C-128          |
| <b>Determinación de masa unitaria</b>    | NTE<br>INEN 858   | ASTM C-29           |
| <b>Impurezas orgánicas en árido fino</b> | NTE<br>INEN 855   | ASTM C-40           |

### 2.1 Características de los materiales

#### 2.1.1 Residuo PCB

El Residuo PCB viene de los aparatos electrónicos que hay en el hogar. La empresa RECITEC, la cual está ubicada en el cantón Mejía, los recicla y les da un tratamiento de trituración y pulverización por medio de la línea de reciclaje de placas

PCB (Figura 1) que incluye las siguientes máquinas: desfibradora, granulador, máquina de clasificación, máquina de separación, colector de polvo, equipos de purificación de escapes y el panel de control.



Figura 1. Línea de reciclaje de placas PCB.

En la literatura científica se encuentra evidencia de la composición de estos residuos, mediante algunos análisis como la espectroscopía de infrarrojo (FTIR) donde se revela que la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos se compone, principalmente de resina epóxica y fibra de vidrio [4]. Mediante el análisis de determinación de toxicidad de lixiviados (TCLP) se determinó que la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos superan los límites de lixiviación de plomo, por lo tanto, no es recomendable su disposición en rellenos sanitarios [4]. Esta es una razón de peso para proponer la aplicación de este tipo de residuos en materiales de construcción, como hormigones, que sirvan como barrera para evitar la lixiviación de sustancias tóxicas.

Con la finalidad de homogeneizarlo, se realizó el cribado de este residuo (Figura 2), para así determinar el tamaño de estas partículas generadas por el proceso de pulverización, eligiendo los tamices #8; #16; #30; #50; #100 y #200.



Figura 2. Residuo PCB.

### 2.1.2 Agregados

Los agregados fueron adquiridos en la planta de Holcim Pifo, los cuales fueron caracterizados en laboratorio de acuerdo a las normas establecidas en la Tabla 2.

Tabla 2. Ensayos de caracterización de los agregados

| Ensayo                                | Normativa  |
|---------------------------------------|--|
| <b>Análisis Granulométrico</b>        | A. Grueso y A. fino<br>NTE INEN 696                  |
| <b>Peso específico (DRsss, DAsss)</b> | A. fino NTE<br>INEN 856<br>A. grueso NTE<br>INEN 857 |
| <b>Densidad óptima de la mezcla</b>   | Universidad<br>Central del Ecuador                   |

### 2.1.3 Resina poliéster

La resina de poliéster que se usó para esta experimentación tiene propiedades aglomerantes y se comportó como fase continua porque este concreto está clasificado como material compuesto y, por su parte, los agregados actuaron como fase dispersa cuya función es reforzar la matriz de este concreto. La resina está constituida por monómeros agrupados en cadenas poliméricas que desarrollan un comportamiento termoplástico, esta resina presenta buena resistencia térmica, química y mecánica a la compresión [8]. Las propiedades de la resina utilizada para esta experimentación se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. *Propiedades de la resina poliéster RD1.*

| Contenido de sólidos      | 73 ± 1 %         |
|---------------------------|------------------|
| Densidad a 25°C           | 1.15 ± 0.02 g/ml |
| Tiempo de gel             | 17 ± 8 minutos   |
| Número de ácido           | 40 mg/g          |
| Pico exotérmico           | 148 ± 28 C°      |
| Tiempo al pico exotérmico | 17 ± 8 minutos   |
| Dureza Barcol             | 44 - 47          |

#### 2.1.4 Estireno monómero

Previo a su utilización, la resina debe ser mezclada con monómeros de estireno para reducir su viscosidad y permitir su curado posterior con la adición de iniciadores y promotores de radicales libres adecuados. Estos monómeros facilitan la integración de las cadenas lineales a los poliésteres, generando puentes entre los enlaces dobles existentes [9]. El proveedor recomienda que se debe usar hasta un 25% en peso con relación a la resina.

#### 2.1.5 Mek Peróxido

Para que la resina cumpla su cometido de convertirse en un cuerpo sólido, requiere de un catalizador que es el peróxido de Mek (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>O<sub>6</sub>); el cual crea una serie de reacciones que provocan que los componentes químicos de la resina reaccionen y se enlacen [10]. El peróxido de Mek (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>O<sub>6</sub>), también conocido como peróxido metil etil cetona, es un compuesto promueve que se desencadene la reacción química en la resina y la active para que sea capaz de ligar a los agregados, provocando la gelificación y endurecimiento final [11].

#### 2.1.6 Octoato de cobalto

Otro compuesto importante es el octoato de cobalto, el cual vuelve viable el fraguado de la resina sin necesidad de aplicar calor. Permitiendo que el proceso de reticulación se pueda generar a temperatura ambiente [12].

## 2.2 Diseño de hormigón polimérico

Para el presente artículo académico se realizaron cinco mezclas para probetas en las cuales se sustituyó el porcentaje de masa de resina por masa de residuo de PCBs en los valores de 5%, 10%, 15% y 20%, esto con la finalidad de disminuir la cantidad de resina utilizada y, a su vez, sustituir esa masa con un residuo industrial para una segunda revalorización.

Para la dosificación se siguió el método de Densidad Óptima desarrollada en el laboratorio de la Universidad Central del Ecuador, ya que este método nos permite usar la mínima cantidad de material cementante. Este método consiste en crear una roca artificial, rellenando los espacios vacíos generados por la mezcla de los agregados por pasta cemento [13], que en su defecto para nuestra investigación será rellena por masa resina la cual además de ocupar los espacios vacíos debe recubrir todas las partículas, constituyendo un nexo de unión entre ellas para crear un hormigón polimérico. Para el diseño de la mezcla de hormigón se requiere primero obtener los datos de ensayos de laboratorio necesarios para dicho método estos son los establecidos en la Tabla 2.

## 2.3 Ensayos de resistencia

Debido a que no existe una normativa estándar para ensayar este tipo de hormigón, se tomaron como referencia las normas ASTM C 39 y ASTM C 293. La resistencia a la compresión simple se llevó a cabo en una prensa eléctrica con marcador digital, a una carga constante de 45 kN/min hasta llegar a su rotura o falla.



Figura 3. Ensayo a compresión.

La resistencia a la flexión fue hecha con una prensa. Se generó una carga constante de 2kN/min en el centro del claro de la viga hasta su rotura o falla con una luz libre de 225 mm.



Figura 4. Ensayo a flexión.

## 2.4 Elaboración de probetas

En cuanto a la elaboración de las probetas, fue necesario secar al horno por 24 horas a 100 °C los agregados pétreos y el residuo para así evitar que el agua impidiera la adherencia de la resina con estos materiales.

Respecto al tamaño de las probetas para el ensayo de compresión, se fabricaron 9 cilindros para cada mezcla de CP, y se ensayó tres de cada edad porque según la norma NTE INEN 1 573:2010 (ASTM C 39) para obtener resultados reales se debe considerar, para cilindros pequeños la

variación de resistencias entre cilindros y un coeficiente de variación, en este caso nuestros ensayos cumplen con las dos condiciones. Las dimensiones de los cilindros son de 70 mm de diámetro y 150 mm de altura, debido a sus altas resistencias y para el ensayo de flexión se moldearon los mismos 5 tipos de mezclas con 3 probetas cada una. Al día 7 fueron ensayadas, pues, la resina alcanza el grado máximo de curado a esa edad [14], y la resistencia a la compresión casi se vuelve constante luego de este tiempo de curado en seco [15]. Por su parte, las probetas tipo viga para flexión fueron de 50mm x 50mm x 305mm.

En cuanto a la realización de la mezcla, se procedió primero a utilizar los agregados en los porcentajes óptimos y el residuo PCB, luego, a la resina se la diluyó con estireno monómero. Se colocó el 0.01% en peso de octoato de cobalto en relación a la masa resina. Posteriormente, se agregó Mek peróxido e inmediatamente se vertió la masa de resina sobre los agregados y se procedió a mezclar por aproximadamente 3 minutos. Luego, la mezcla fue vertida en los moldes, se vibró el contenido y se les dejó secar a temperatura ambiente.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Análisis granulométrico

#### 3.1.1 Análisis granulométrico del agregado grueso

Para este ensayo se pudo obtener que el tamaño máximo nominal es de 9,5 mm, un tamaño máximo de 12.5 mm y un módulo de finura de 5.7, se puede observar en la Figura 5 que cumple con las especificaciones al ingresar dentro de la faja granulométrica.



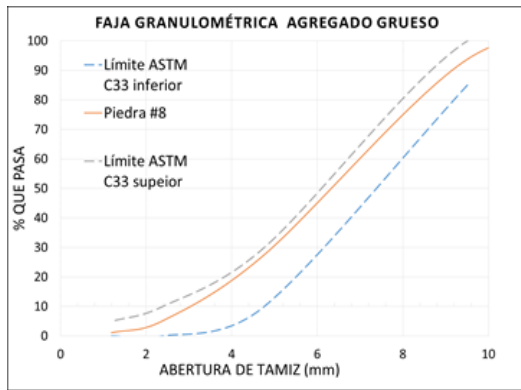


Figura 5. Curva granulométrica Agregado Grueso.

### 3.1.2 Análisis Granulométrico Agregado Fino

Para el ensayo granulométrico del Agregado Fino se puede observar en la Figura 6 que, la curva no ingresa dentro de la faja granulométrica establecida en la norma INEN 696, es por este motivo el cual se decidió diseñar por el método de densidad óptima ya que la propiedad de granulometría está ligada a la cantidad de cementante a ser empleada y este método permite utilizar la menor cantidad de cementante aún con agregados que no encajen perfectamente en la granulometría.

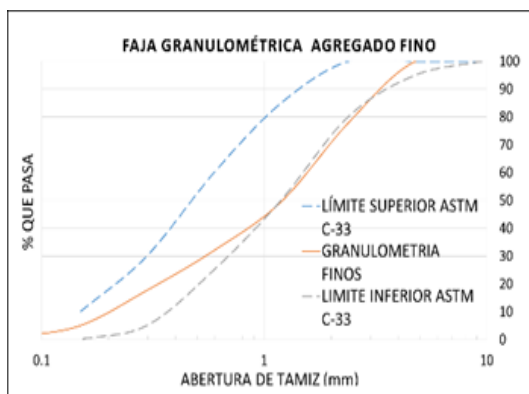


Figura 6. Granulometría agregado fino.

### 3.2 Peso específico de los agregados

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos de los pesos específicos de los agregados

Tabla 4. Pesos específicos de los agregados.

| Tipo de Agregado | Peso específico (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------------|--------------------------------------|
| Agregado Grueso  | 2690                                 |
| Agregado Fino    | 2640                                 |

### 3.3 Densidad óptima

Se seleccionó el método de densidad óptima para la determinación de proporciones de los materiales, principalmente porque ha demostrado buenos resultados en la fabricación de hormigones de alta resistencia en el país como se constata en el trabajo desarrollado por Almeida [16]. El desarrollo del mismo consistió en la mezcla de los agregados grueso y fino de una forma compactada, procediendo a calcular su densidad primero con el 100% del agregado grueso e ir aumentando en 10% de agregado fino hasta poder llegar al estado deseado de la mezcla. Al llegar a su densidad aparente máxima. Esta mezcla se procede a disminuir en un 4% del agregado fino, determinando cuál es la densidad óptima y los porcentajes adecuados. En la Figura 7 se muestra la gráfica obtenida con la mezcla de los agregados grueso y fino y las densidades obtenidas.

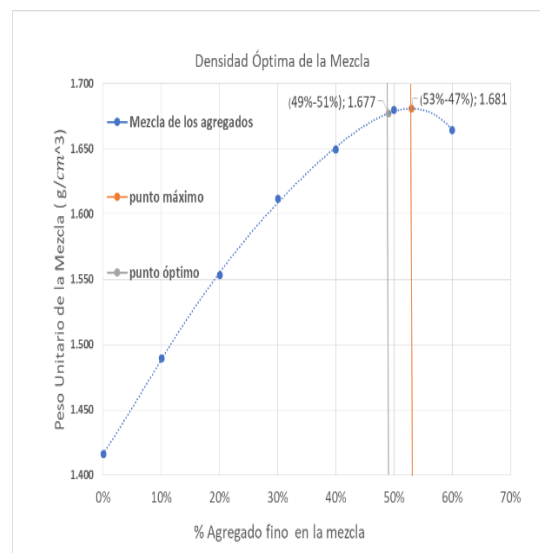


Figura 7. Densidad óptima de la mezcla de los agregados.

En la Tabla 5 se muestran los resultados del ensayo de densidad óptima.

Tabla 5. Resultados de ensayo de Densidad óptima.

| Tipo de Agregado      | Cantidad | Unidad            |
|-----------------------|----------|-------------------|
| Agregado Grueso (%AR) | 51       | %                 |
| Agregado Fino (%AA)   | 49       | %                 |
| Densidad Óptima       | 1.677    | kg/m <sup>3</sup> |

### 3.4 Tamizado del residuo PCB

Las partículas del residuo luego de la etapa de pulverización presentaron un tamaño máximo de 1.19 mm y, en su mayoría, en un porcentaje del 64%, retiene el tamiz número 30.

### 3.5 Diseño del hormigón polimérico con el método de densidad óptima

El diseño del hormigón polimérico requirió los resultados obtenidos en la Tabla 3 y Tabla 4. Además, se utilizó una relación de agua cemento de 0.65 y se estimó un asentamiento de 5cm como referencia, para que, a partir de la dosificación de un hormigón tradicional a base de cemento portland, sustituir el porcentaje de cemento por masa resina (resina poliéster diluida en estireno monómero) con el fin de elaborar el hormigón polimérico, como se representa en la Tabla 6.

Tabla 6. Diseño base de experimento.

| Parámetro         | Cantidad | Unidad      |
|-------------------|----------|-------------|
| Agregado grueso   | 41.19    | % (en peso) |
| Agregado fino     | 38.84    | % (en peso) |
| Resina Poliéster  | 15.97    | % (en peso) |
| Estireno monómero | 3.99     | % (en peso) |

|                                       |     |   |
|---------------------------------------|-----|---|
| Mek peróxido (en peso de masa resina) | 2   | % |
| Cobalto (en peso de masa resina)      | 0.1 | % |

La Tabla 7 corresponde a los porcentajes en peso del diseño del hormigón polimérico usando el residuo PCB.

Tabla 7. Diseño de experimentos.

| Sustitución de resina % | 0     | 5     | 10    | 15    | 20    |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Agregado grueso %       | 41.19 | 41.19 | 41.19 | 41.19 | 41.19 |
| Agregado fino %         | 38.84 | 38.84 | 38.84 | 38.84 | 38.84 |
| Resina Poliéster %      | 15.97 | 15.17 | 14.37 | 13.57 | 12.78 |
| Estireno monómero %     | 3.99  | 3.79  | 3.59  | 3.39  | 3.19  |
| Residuo PCB %           | 0     | 1     | 2     | 2.99  | 3.99  |

### 3.6 Ensayos de compresión

Los resultados resumidos en la Figura 8 variaron con los incrementos del porcentaje de residuo en relación a la cantidad de resina. Se obtuvieron resistencias relativamente altas que entran en el rango de hormigones poliméricos realizados en varios estudios y es de 50 MPa a 150 MPa [17]. Para dar mayor sustento a este análisis de resultados se han verificado otros trabajos de investigación enfocados en hormigones poliméricos. Por ejemplo, el hormigón producido por Abdel [18] muestra resistencias a la compresión axial entre 92 y 112 MPa con un porcentaje de resina poliéster al 15% en peso, muy semejante con el alcanzado en el presente trabajo con un porcentaje de 15.97 % de resina correspondiente a la mezcla 0% residuo PCB, en el cual se obtuvo la resistencia promedio de 105.72 MPa.

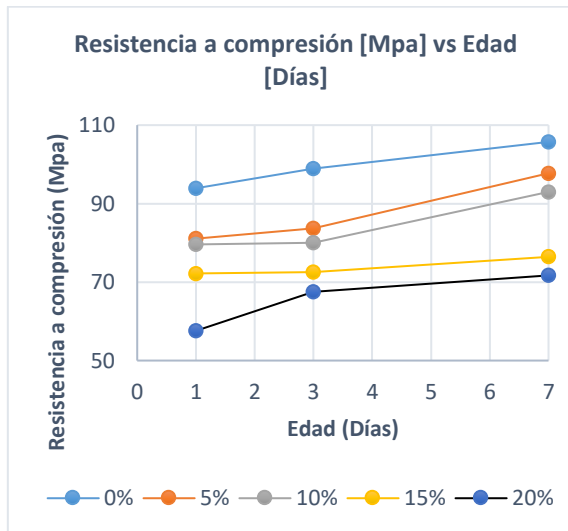


Figura 8. Resistencia Vs Edad.

También se comparó el presente CP con el desarrollado por Valencia [19] que usó un 15.13 % de resina poliéster y 3.03 % de escoria de alto horno, y obtuvo resistencia de 70 MPa; con el presente CP con 15.17% de resina poliéster y un porcentaje de 1% de residuo, que presentó una resistencia a la compresión superior, llegando a un promedio de 97.73 MPa.

La resistencia a la compresión en todas las edades ensayadas no varió entre 3 probetas más del 10,6 por ciento para cilindros pequeños, como lo estipula la norma NTE INEN 1 573:2010 en la tabla 4 (Precisión dentro del ensayo). El coeficiente de variación obtenido en estas probetas es bajo, y no supera el límite de los cilindros grandes de esta norma que es del 14%, por lo que se puede decir que son porcentajes aceptables para estas resistencias.

### 3.7 Ensayos flexión

En los resultados mostrados en la Figura 9 es notable que la resistencia a la flexión se ve reducida con la disminución de resina y la incorporación de residuo como sustitución.

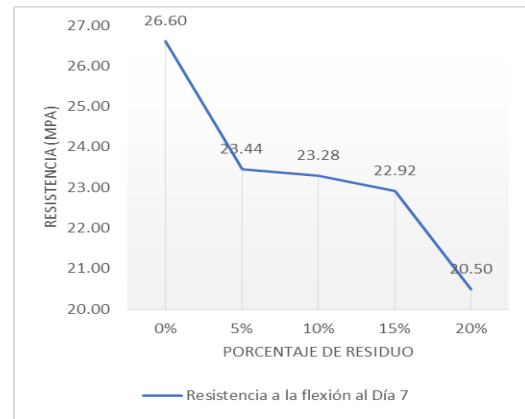


Figura 9 Resistencia a la flexión día 7

Continuando con el análisis de resultados, las resistencias alcanzadas en este trabajo son muy semejantes a las obtenidas por Morales [20], que reportó una resistencia a la flexión de 23.99 MPa, con el uso de 12 % de resina e incorporando 2% de material reciclado de fibra de vidrio; con las del presente artículo que llegaron a 23.44 MPa con un porcentaje de 15.17% de resina y 1% de residuo PCB.

## 4. Conclusiones

Con la presente investigación se comprobó que, es posible elaborar un hormigón polimérico de resina poliéster (y sus respectivos aditivos) con la incorporación de residuos PCB y agregados pétreos adquiridos en la planta Holcim Pifo.

La mezcla total que se realizó con los áridos, resina poliéster y los residuos de placas electrónicas (PCB), en el estado fresco son trabajables en los primeros tres porcentajes que se reemplazó la resina en porcentajes bajos, mientras que en los dos últimos porcentajes como la cantidad de resina disminuye la mezcla no es muy trabajable por lo tanto se preparó rápidamente los cilindros para evitar que la mezcla se seque.

En el hormigón polimérico diseñado se sustituyó la resina poliéster, con la incorporación de residuos de placas electrónicas (PCB), en porcentajes variados, que fueron del 5% hasta un

máximo del 20%. En el máximo alcanzado se evidenció un obstáculo en cuanto a la trabajabilidad de la mezcla.

Se encontró una gran ventaja sobre los materiales de hormigones elaborados de forma tradicional en el ámbito de la resistencia a corto plazo del material. En el día 1 se evidenció que las resistencias del CP con 0% de residuo PCB alcanzan un 90% de resistencia máxima, comparada a las del cemento Portland, que alcanzan un 90% en el día 14. En el día 3, la resistencia aumentó en un 5% en relación al día 1. Para el día 7, la mezcla llegó a un 105MPa, siendo esta la resistencia máxima.

Bajo el alcance de esta experimentación, se propone como el mejor diseño de mezcla el que contiene 1% del residuo PCB, ya que permitió el ahorro del 5% de resina, desarrollando una muy buena trabajabilidad en el estado fresco y presentando altas resistencias a compresión y flexión.

Como recomendación se sugiere analizar previamente el entorno en el que se desea utilizar el hormigón polimérico propuesto en este trabajo, ya que hay algunas condiciones que pueden conflictuar su desempeño mecánico. Por ejemplo, la resina poliéster sufre descomposición térmica crítica entre los 350°C y 400°C; por lo que no es apto para exposición a altas temperaturas. Por otro lado, se disminuyen las propiedades mecánicas de la resina cuando se le expone a pH drástico; por lo que se recomienda que este hormigón no sea expuesto a ácidos inorgánicos fuertes, tampoco a ácidos orgánicos como acético, fórmico o láctico, álcalis fuertes ni líquidos combustibles [21].

Se recomienda hacer estudios sobre el módulo de elasticidad ya que las propiedades visco-elásticas del polímero causa resultados bajos.

Este hormigón polimérico resulta ventajoso para la elaboración de canales, debido a su superficie lisa, resistencia a productos químicos, además, siendo este

impermeable nos facilitará la evacuación de los fluidos.

Como desventaja de este hormigón, resulta la degradación lenta debido a despolimerización, producto de la radiación solar. Este un motivo para no usarlo como un pavimento rígido en carreteras viales.

## **Referencias**

- [1] The Global E-Waste Monitor. Statistics Partnership (GESP) formed by the United Nations University (UNU), the International Telecommunication Union (ITU) and the International Solid Waste Association (ISWA) in close collaboration with the UN Environment Programme (UNEP), (2020).
- [2] Baldé, C.P., Forti V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann, P. Universidad de las Naciones Unidas (UNU), Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA), Bonn/Ginebra/Viena, (2017).
- [3] J. La Dou. Printed circuit board industry. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 209(3), 211-219, (2006).
- [4] Loyo C, Arroyo C, Aldas M y Montero R. "Extracción y Caracterización de la Fracción No Metálica de las Tarjetas de Circuitos Impresos de Computadoras Desechadas". Escuela Politécnica Nacional, (2015).
- [5] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). *Reseña Toxicológica de las Fibras Vítreas Sintéticas* (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU. Servicio de Salud Pública, (2004).
- [6] Morales Ibarra, Rodolfo. Uso de materiales compuestos reciclados de fibra de vidrio-poliéster como cargas en concreto polimérico. XVI. 48-53, (2013).
- [7] Zijlstra, E. Polymer concrete, if not concrete, what else?, *Materia Inspiration Centre*, Pedro de Medinalaan, Amsterdam, Netherlands, (2007).
- [8] Bendezú-Reyes J. H. "Los plásticos reforzados en fibra de vidrio (PRFV), sus aplicaciones y desarrollo en la industria nacional". Tesis para obtener el título de Ingeniero Industrial, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. pp. 7-16, (2002).
- [9] Rebeiz, K.S. Serhal, S.P. & Fowler, D.W. Shear strength of reinforced polyester concrete using recycled PET, *Journal of Structural Engineering* New York, N.Y., 121(9): pp 1370-1375, (1995).
- [10] Cristina del Pilar Buenaño Mariño. "Determinación de un porcentaje de resina de poliéster en un concreto polimérico para alcanzar una alta resistencia a compresión". Universidad Técnica de Ambato, (2018).
- [11] T Jandra "Club de Vela Platja LLarga", [En línea]. Available: <http://usuaris.tinet.cat/jaranda/Poliester/archivos/Page396.htm>, (2009).
- [12] Aguado, A., & Salla, J. M. Los hormigones con polímeros en la construcción: propiedades y aplicaciones. *Informes de la Construcción*, 39(389), 61-72. <https://doi.org/10.3989/ic.1987.v39.i389.1665>, (1987).
- [13] Chaluiza, A. Relaciones de compresión y tensión en adoquines fabricados con materiales provenientes de la cantera de Pesillo, ubicada en el cantón Cayambe, provincia de Pichincha. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/386/1/T-UCE-0011-19.pdf>, (2012).
- [14] A. B. Janices y I. K..Propiedades Físicas y Mecánicas de Sistemas Bicomponentes,» *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 15, nº 6, pp. 376-401, (2014).
- [15] Bedi, R, Chandra, R, Singh, SP. Mechanical properties of polymer concrete. (390): 12, (2013).

[16] Almeida, W. Análisis comparativo de métodos de diseño de mezclas de un hormigón de alta resistencia conformado por agregados procedentes de la cantera de Pintag. UPS. Ecuador, (2019).

[17] Hegardt. Qué es el hormigón polímero. Obtenido de: <http://www.hegardt.es/area-tecnica/a5-que-es-el-hormigon-polimero>, (2012).

[18] Abdel, H. Flexural behavior of polymer concrete. Kuwait University. Kuwait, (1999).

[19] Valencia M, Collazos P, Mina J, Toro E. Caracterización fisicomecánica de concreto polimérico basado en resina poliéster. Rev. Guillermo Ockham [Internet]. 1 de junio de 2010 [citado 25 de abril de 2021];8(1). Disponible en: <https://revistas.usb.edu.co/index.php/GuillermoOckham/article/view/556>, (2010).

[20] Morales, R. Uso de materiales reciclados de fibra de vidrio como cargas en concreto polímero. UANL. México, (2013).

[21] Yang, G., Pedro R., Hongliang Z., Man H., Feng L. Unsaturated polyester resin concrete. ELSEVIER. Países Bajos, (2019).