

### **Información Importante**

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del catálogo en línea, página web y Repositorio Institucional del CRAI-USTA, así como en las redes sociales y demás sitios web de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor, nunca para usos comerciales.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

**Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-USTA  
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**Determinación del comportamiento mecánico mediante el ensayo de resistencia a la compresión de concreto adicionado con cementante reutilizado proveniente de escombros de la construcción usando un análisis estadístico inferencial.**

**Ruth Mary Maldonado Mendez**

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

**Director**

**Julián Orlando Herrera Ortiz**

**Magíster Ingeniería de Materiales**

**Universidad Santo Tomás**

**División de Ingenierías y Arquitectura**

**Facultad de Ingeniería Industrial**

**Bucaramanga**

**2020**

***Dedicatoria***

*A Dios mi padre celestial, mi guía y mi fuerza, mi mentor en mi proyecto de vida. A él doy infinitas gracias por este logro cumplido, que por su infinita misericordia hoy doy por cumplido.*

*A mi hijo no nato José María, que después de su partida me sigue dando fuerza cada día para seguir luchando por mis sueños.*

*A mi madre María Zoila, que ha respetado mis decisiones, para hoy poder culminar mi carrera, gracias por estar a mi lado.*

*Agradecimientos*

*Al director de proyecto Msc. Julián Herrera, quien logro poner a prueba mis capacidades y conocimientos, por su valiosa guía y asesoramiento en el desarrollo de cada etapa que requirió esta investigación, agradezco el tiempo dedicado.*

*A mi Hermano sé que no era su obligación, pero me brindo apoyo en mi educación básica y secundaria, agradezco enseñarme a través de su vida a valerme por mí misma.*

*A mi familia, mis tíos: Mario, Alirio y mi primo el Padre Feliciano que a pesar de la distancia he contado con su apoyo moral y espiritual.*

*Un sincero agradecimiento a cada uno de ellos.*

## Tabla Contenido

1.	Definición del Problema _____	9
2.	Justificación _____	10
3.	Objetivo General _____	11
3.1.	Objetivos Específicos _____	11
4.	Alcance _____	12
5.	Marco Referencial _____	12
5.1.	Marco Teórico _____	12
5.2.	Marco Conceptual _____	15
5.2.1.	Escombros _____	15
5.2.2.	Concreto _____	16
5.2.3.	Material cementante _____	16
5.2.4.	Cemento _____	17
5.2.5.	Módulo de finura _____	17
5.2.6.	Resistencia a la compresión _____	18
5.2.7.	Varilla compactadora _____	19
5.2.8.	Mazo _____	19
5.3.	Marco Legal y Normativo _____	19
5.4.	Marco Histórico _____	22
5.5.	Estado del arte _____	25
6.	Metodología _____	29
6.1.	Etapa 1: Revisión Bibliográfica _____	30
6.2.	Etapa 2: Adquisición de Material (Escombros) _____	30
6.3.	Etapa 3: Establecimiento de Módulo de Finura _____	31
6.3.1.	Actividad 1: Selección del escombros _____	31
6.3.2.	Actividad 2: Trituración del escombros _____	32
6.3.3.	Actividad 3: Cálculo del módulo de finura del cementante _____	33
6.4.	Etapa 4: Fabricación de Especímenes de Concreto _____	33

6.4.1.	Actividad 1: Elaboración del diseño de mezcla _____	34
6.4.2.	Actividad 2: Fabricación de muestras de concreto _____	36
6.5.	Etapa 5: Evaluación Muestras de Concreto Mediante Resistencia a la Compresión	40
6.6.	Etapa 6: Análisis de Resultados Mediante Estadística Inferencial _____	42
6.7.	Etapa 7: Escritura del Informe Final _____	43
7.	Resultados y Análisis de Resultados _____	43
7.1.	Caracterización de Agregados _____	43
7.2.	Diseño de Mezcla _____	44
7.3.	Resistencia a la Compresión _____	45
7.4.	Análisis Mediante Estadística Inferencial _____	47
7.4.1.	Análisis de la varianza _____	48
7.4.2.	Diagrama de Pareto _____	49
7.4.3.	Grafica de medias _____	51
8.	Conclusiones _____	53
9.	Recomendaciones _____	54
	Bibliografía _____	55

**Lista de tablas**

Tabla 1: <i>Tolerancia de tiempo para los especímenes</i> .....	20
Tabla 2: <i>Presión dentro de la prueba de las muestras</i> .....	22
Tabla 3: <i>Gravedades Especificas</i> .....	44
Tabla 4: <i>Caracterización del material</i> .....	44
Tabla 5: <i>Diseño de mezcla</i> .....	45
Tabla 6: <i>Resultados obtenidos en la evaluación de especímenes</i> .....	45
Tabla 7: <i>Conversiones estadísticas del Software</i> .....	48
Tabla 8: <i>Análisis de Varianza para <math>F'c</math></i> .....	48
Tabla 9: <i>Pruebas de Múltiple Rangos para <math>F'c</math> por Reemplazo</i> .....	52

### Lista de figuras

<i>Figura 1:</i> Metodología del Proyecto.....	29
<i>Figura 2:</i> Pedrusco voluminoso, impurezas y agregado grueso .....	31
<i>Figura 3:</i> Proceso de obtención del módulo de finura.....	32
<i>Figura 4:</i> Prueba de asentamiento .....	34
<i>Figura 5:</i> Agregado grueso lavado .....	37
<i>Figura 6:</i> Alistamiento de probetas .....	37
<i>Figura 7:</i> Fabricación de especímenes .....	39
<i>Figura 8:</i> Prueba de resistencia a la compresión .....	41
<i>Figura 9:</i> Resistencia a la compresión por edad.....	46
<i>Figura 10:</i> Diagrama de Pareto.....	49
<i>Figura 11:</i> Efectos principales.....	50
<i>Figura 12:</i> Superficie de respuesta .....	51
<i>Figura 13:</i> Grafica de medias .....	52

## 1. Definición del Problema

Cuando escasamente alumbraba el primer principio de la termodinámica se dio comienzo a un impactante descubrimiento a nivel de la construcción.

Lavoisier aporta con su teoría; la materia no se crea ni se destruye, solo se transforma y ante este nuevo contexto el ingeniero de minas Collet-Descotils en 1813 descubre en la sílice el nuevo y autentico agente del fraguado en los morteros, más tarde Vicat descubre la hidratación artificial a partir de calcinación de mezcla entre cal y arcilla, materia silícica.

[1]

Generando lo que hoy conocemos como Clinker y el principio de producción del concreto, el cual ha permitido avances a nivel mundial. Sopesándolo como el material por excelencia en las construcciones no solo por sus propiedades mecánicas, de durabilidad, maleabilidad y económicas, sino por su alto consumo.

Con base a lo expuesto anteriormente, se da la siguiente premisa:

La construcción es una de las actividades industriales esenciales para el desarrollo y progreso de las ciudades. Sin embargo, es al mismo tiempo, uno de los factores que más influyen en los impactos sobre el medio ambiente. Uno de los aspectos que más preocupa, es el volumen de escombros que se genera con la construcción de nuevas obras y la demolición y remodelación de estructuras viejas. [2].

Se debe señalar sobre las construcciones que las “acciones que se proponen en la literatura están enfocadas a solo dos etapas del ciclo de vida de un proyecto, diseño y construcción. Dejando a un lado las etapas de operación, mantenimiento y término de su vida útil” [3]. Es por esto por lo que

el presente estudio se enfoca en la última etapa comprendida por Aldana como la terminación de la vida útil, que para algunos investigadores no finaliza, como es el caso de Graich, quien observó resultados notables en la resistencia a la flexión y especialmente a la compresión en los morteros donde se reemplazaba parte de los agregados por escombros logrando obtener: a) mayor compacidad del mortero por ende mayor resistencia, b) apariencia de cierta capacidad aglomerante brindando aumento de flexión y compresión. [4].

Con base en lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación. Si un agregado proveniente de escombros de la construcción aumenta la resistencia a flexión y compresión, ¿Qué influencia podría tener un reemplazo de cemento portland de uso general por material cementante proveniente de desechos de la construcción, sobre la resistencia a la compresión del material cementicio?

## **2. Justificación**

El concreto ha generado progresos en la construcción por sus propiedades mecánicas, de durabilidad, manejabilidad, entre otras, Sin embargo, es alarmante su impacto en el medio ambiente por la generación de escombros, provenientes de demoliciones o por remodelación de estructuras antiguas. Algunos de estos escombros hoy se utilizan como agregado grueso, con resultados favorables sobre la resistencia a la compresión de concreto sin refuerzo. [2]

Por otra parte, el uso de escombros de mortero, según la revisión bibliográfica no ha sido usado como material cementante reutilizado, por tal motivo, el presente estudio busca establecer el efecto de un cementante proveniente de escombros de construcción. Para esto, se determinará el módulo de finura al cementante obtenido de dichos escombros y que permita su uso en la fabricación de concreto convencional. En este sentido, se buscará obtener una proporción favorable entre cemento

portland y el material cementante de escombros que permita mantener un comportamiento mecánico adecuado del concreto en estudio. Este comportamiento mecánico será estudiado mediante el ensayo de resistencia a la compresión y evaluado mediante análisis estadístico inferencial.

De manera general, el presente proyecto de investigación busca evaluar una posible alternativa para el uso de escombros provenientes de la construcción, adicional a las ya existentes, la cual podría llegar a contribuir en la disminución de dicho material dispuesto en los vertederos y al uso excesivo de cemento Portland proveniente de las plantas de producción.

### **3. Objetivo General**

Determinar el comportamiento mecánico mediante el ensayo de resistencia a la compresión de concreto adicionado con cementante reutilizado proveniente de escombros de la construcción.

#### **3.1. Objetivos Específicos**

- Establecer el módulo de finura de un cementante obtenido de escombros de construcción que permita ser usado para la fabricación de concreto convencional.
- Definir la proporción más adecuada de cemento Portland y cementante procedente de escombros de construcción con base en la resistencia a la compresión del material.
- Determinar el efecto del uso de un cementante proveniente de escombros de construcción sobre la resistencia a la compresión de concreto convencional mediante análisis estadístico inferencial.

#### **4. Alcance**

Conocer los efectos que tendrá el remplazo de cemento portland de uso general por material cementante proveniente de desechos de la construcción sobre la resistencia a la compresión, respecto al concreto convencional.

#### **5. Marco Referencial**

##### **5.1. Marco Teórico**

Los planes de desarrollo han permitido que Colombia avance en nuevos procesos que favorezcan a la ciudadanía, medio ambiente, financiación, entre otros aspectos. Logrando así implementar actividades para la recolección domiciliaria y búsqueda de nuevos centros de acopio para los escombros, como se observó en la ciudad de Medellín; de igual forma Cali propende por el manejo y la regulación conjunta de dichos residuos con las empresas prestadoras del servicio público de aseo. Por último, Ibagué incurre con nuevos centros de acopio y sanciones para aquellos que no cumplan con la nueva normatividad, pero una mirada a nivel internacional muestra las diferencias respecto a Colombia, encontramos legislaciones aprobadas que contemplan el manejo de escombros, obtención de utilidad en los procesos y el desarrollo de tecnologías del reciclaje, las cuales son importantes hoy en día para la sociedad; podemos encontrar instituciones como IARCOS (Institución Argentina de la Construcción Sustentable) la cual diseña, construye, renueva y demuele infraestructuras para posteriormente manipular los escombros de una manera ambientalmente sustentable. En Latinoamérica sobresale Brasil que crea una Planta dedicada al reciclaje de escombros, incursionando con nuevos estándares para recudir y desarrollar nuevos productos reciclados de alta calidad ofrecidos a la industria, le sigue Europa que fomenta el

reciclaje y la clasificación según las características físicas del material, verificando principalmente la composición y comportamiento después de los procesos y buscando siempre el alcance de las 3R: Reducir, Reutilizar y Reciclar. [2]

Es por eso por lo que el uso de materiales reciclables en la industria de la construcción en lugares como el continente europeo, tienen contemplado en sus códigos de construcción el uso de materiales reciclados. Pero aun en muchos países como Colombia se encuentran barreras para su implementación general, por la mala percepción que se tiene de su calidad. [5].

El escombros debe ser un foco de atención a nivel mundial porque como fue afirmado por: De los Santos, Jiménez, Gómez, y Canepa:

La recolección selectiva permite que los escombros que todavía pueden cumplir un ciclo productivo lo hagan, sin verse afectados por otros escombros como la madera o la tierra, cuyo alto contenido de materia orgánica cortaría el proceso de reutilización o reciclaje de los residuos inertes como el concreto. [6].

Recapitulando Brasil y Europa dan primordial atención a la recolección, selección y evaluación de escombros ya que les permitirá reutilizar este material en nuevos productos de alta calidad. En un contexto similar las investigaciones realizadas en la Universidad de Cartagena han demostrado que los escombros provenientes de la construcción no solo tienen propiedades favorables como agregados en hormigón, por contrario, tiene contribuciones en la fabricación de adoquines.

Los agregados provenientes de materiales reciclados obtuvieron resultados similares a los agregados naturales en cuanto a características mecánicas, lo que fue muy influyente para saber sobre la posibilidad de elaboración de adoquines con agregados procedentes de escombros reciclados, puesto que para llegar a esos resultados se requirió contar con las

características de agregados requeridas por la Norma Técnica Colombiana NTC 2017, para que de igual manera el adoquín alcance sus respectivas características. [5].

Investigaciones colombianas como esta comprueban que el material reciclado mezclado con material original brinda calidad sin mayores alteraciones en sus propiedades mecánicas ya que guardan similitudes, pero aun así no se observa un uso masivo de dicho material proveniente de los desechos y demoliciones de la construcción.

Según estudios previos realizados en Colombia, en promedio el 55% de los RCD<sup>1</sup> contiene agregados potencialmente reciclables, aproximadamente 60% de materiales a base de concreto, cerámicos y ladrillo (tipo I, tipo II, respectivamente, de acuerdo con la clasificación RILEM), al cual le siguen en menor proporción los materiales orgánicos y plásticos. Son, además, potencialmente apropiados, según la normativa internacional vigente, para convertirse en una fuente alternativa de materia prima en la fabricación de infraestructura urbana, y lograr beneficios económicos y ambientales, sin mermar la calidad técnica del producto terminado. Si se comparan las especificaciones nacionales previstas por el ICONTEC, con los resultados de Campinae-Braeil, resulta viable la fabricación de bloques a base de materiales reciclables. Los porcentajes de absorción y la resistencia a la compresión, para un tiempo de fraguado de 28 días, se encuentran dentro de los límites permisibles de las Normas Técnicas Colombianas: NTC 4017, Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla; NTC 247, Bloques huecos de concreto para muros; NTC 673, Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto y NTC 3546, Métodos de ensayo para determinar la

---

<sup>1</sup> Residuos de Construcción y Demolición

evaluación en laboratorio y en obra, de morteros para unidades de mampostería simple y reforzada, Aunque según las normas INVIAS el porcentaje de absorción no alcanza el rango establecido, al estar en 4,5 %, fue cercano a lo esperado. [7].

Las resistencias tempranas a la compresión de los hormigones estructurales son menores en los reciclados que en el hormigón patrón. A los 7 días los primeros alcanzan valores que van del 63 al 69% de sus resistencias a 28 días, en tanto que el de referencia llega al 83%. A los 28 días las resistencias de los hormigones reciclados no difieren sustancialmente de la del patrón, estando en un rango que va del 92 al 100% de la de éste. A los 60 días, los que tienen componentes reciclados alcanzan valores muy parecidos entre sí, estabilizándose en el 90% del de referencia. [8].

No se considera utilizar al 100% el material reciclado, ya que por sí solo no puede brindar las mínimas características mecánicas requeridas, pero a nivel mundial se siguen observando estudios que comprueban que si se logra una proporción adecuada con una mezcla original se da una solución a corto plazo.

## 5.2. Marco Conceptual

**5.2.1. Escombros:** Existen varios conceptos sobre el término, pero para su definición solo tendremos en cuenta cuatro autores:

“El término escombro se le da al material residuo de actividades como demolición, remodelación y construcción. Normalmente, los escombros se clasifican como residuos urbanos, aunque están más relacionados con una actividad industrial que doméstica” [5].

“Residuos de materiales de construcción, embalaje y escombros que resultan de las operaciones de construcción, remodelación, reparación y demolición de casas, edificios industriales y comerciales, y otras estructuras” [9].

“Cualquier material, aparte de materiales de la tierra, los cuales necesitan ser transportados a otra parte desde los sitios de construcción o utilizados dentro del sitio de construcción para los propósitos de llenos, incineración, reciclaje, reutilización o compostaje” [10].

“Suelo, material y otros generados por cualquier clase de actividades de construcción, incluyendo el desarrollo, rehabilitación y remodelación de proyectos de construcción” [11].

En conclusión, se considera un residuo de las actividades producidas por la construcción los cuales se clasifican como residuos urbanos, los mismos pueden ser provenientes de actividades como la demolición, remodelación y la construcción.

**5.2.2. Concreto:** El concreto es definido en la terminología de ASTM (C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates) como un material compuesto que consiste en un medio de enlace dentro del cual se embeben partículas o fragmentos de agregado. Para ello se utiliza un cemento hidráulico, agua, triturado y arena. [5].

**5.2.3. Material cementante:** “Según la ASTM (American Society for Testing and Materials), los materiales cementantes suplementarios (MCS) son materiales inorgánicos que contribuyen en las propiedades de una mezcla cementica a través de la actividad hidráulica, puzolánica o ambas” [12].

“Un material cementante es aquel que tiene las propiedades de adhesión y cohesión necesarias para unir agregados y conformar una masa solida con una resistencia y durabilidad adecuada” [13]

Los materiales cementantes conocidos como materiales ecológicos, provienen de desechos industriales y áridos reciclados, que presenta variabilidad en tamaño, forma, composición química, color, grano cristalino; dichas características son analizadas para determinar su desempeño como nuevos cementantes alternativos logrando alcanzar el remplazo total o parcial de los cementos convencionales, suponiendo un menor impacto ambiental. [14]

El estándar británico lo define como “materiales finamente divididos utilizados en concreto con el fin de mejorar ciertas propiedades o alcanzar propiedades especiales” [12].

En síntesis un material cementante es aquel que proviene de los desechos industriales y áridos reciclados, que al cumplir su función presenta otro tipo de características a las iniciales, las cuales son analizadas para determinar si proporcionara una adhesión y cohesión óptima en la fabricación de nuevos cementos alternativos.

**5.2.4. Cemento:** Por cemento, según lo define la ASTM (C219 Terminol ogy Related to Hydraulic Cement), es un material que endurece por reacciones químicas con el agua. El más conocido es el cemento Portland, el cual se produce por la pulverización de Clinker que es formado por silicatos de calcio y concentraciones controladas de sulfato de calcio. [5].

**5.2.5. Módulo de finura:** “El módulo de finura (parámetro que define que tan gruesa o fina es la arena) es una de las características más relevantes al momento de elegir un agregado fino”. [15]. Es decir que el módulo de finura es que tan grueso o que tan fino será el material que se está analizando.

**5.2.6. Resistencia a la compresión:** Existen varios conceptos sobre el término, pero para su definición solo tendremos en cuenta algunos autores:

Este ensayo consiste en aplicar una carga de compresión axial a los cilindros moldeados o extracciones diamantinas a una velocidad normalizada en un rango prescrito mientras ocurre la falla. La resistencia a la compresión de la probeta es calculada por división de la carga máxima alcanzada durante el ensayo, entre el área de la sección recta de la probeta. [16].

Resistencia máxima que una probeta de concreto, mortero o groute puede sostener, cuando cargada axialmente en compresión en una máquina de ensayo a una velocidad especificada. Normalmente se expresa en fuerza por unidad de área de sección transversal, tal como megapascal (MPa) o libras por pulgada cuadrada (lb/pulg.2 o psi). [17].

La resistencia del concreto es definida como el máximo esfuerzo que puede ser soportado por dicho material sin romperse. Dado que el concreto está destinado principalmente a tomar esfuerzos de compresión, es la medida de su resistencia a dichos esfuerzos la que se utiliza como índice de su calidad [16].

Los resultados de prueba de resistencia a la compresión se emplean fundamentalmente para determinar que la mezcla de concreto elaborada cumpla con los requerimientos de la resistencia especificada,  $f'_c$ , para la cual fue diseñada además debe cumplir con la NTP 339.034 y ASTM C39. [18].

Se puede entender que la resistencia a la compresión es un requisito normativo para el concreto, con el cual se verifica mediante una carga de aplastamiento el esfuerzo máximo que puede soportar antes de la rotura.

**5.2.7. Varilla compactadora:** “Debe ser una varilla de acero cilíndrica recta con al menos el extremo de apisonar redondeado en una punta semiesférica del mismo diámetro de la varilla” [33].

**5.2.8. Mazo:** “Un mazo con una cabeza de hule o cuero crudo” [33].

### **5.3. Marco Legal y Normativo**

El presente proyecto busca conocer los efectos que tendrá el remplazo de cemento portland de uso general por material cementante sobre la resistencia a la compresión. En este sentido, se presenta a continuación el cerco normativo aplicable al presente estudio.

La norma ASTM C39/39M establece la resistencia a la compresión de especies de concreto cilíndricos, siendo una propiedad mecánica determinante y primordial para la calidad del material.

La resistencia (compresión o flexión) es el indicador de la calidad del concreto más universalmente utilizado. A pesar de ser una característica importante, otras propiedades, tales como durabilidad, permeabilidad y resistencia al desgaste se reconocen hoy en día como de igual importancia o, en algunos casos, de mayor importancia, especialmente cuando se considera el ciclo de vida de la estructura. [17]. Se debe tener cuidado en la interpretación de resultados de la resistencia a la compresión, brindados por medio de este método, ya que la resistencia no es una propiedad fundamental o intrínseca del concreto hecho con unos materiales dados. Los valores obtenidos dependen del tamaño y forma del espécimen, dosificación, los procedimientos de mezclado, los métodos de muestreo, edad, temperatura, condiciones de humedad durante el curado, moldeado y fabricación. [19].

Como la norma lo indica la resistencia a la compresión no es una propiedad intrínseca, que se mantiene independiente de su tamaño o forma. Los valores obtenidos estarán sujetos a estas características, es por ello por lo que se debe tener en cuenta:

- “Las muestras no deben ser analizadas si el diámetro de cualquier cilindro difiere de otro diámetro en más del 2%”. [19]
- “El porcentaje de error para las cargas dentro del rango propuesto de la máquina de ensayo no debe exceder el 61% de la carga indicada” [19]
- Cumplir con la tolerancia de tiempo para la rotura:

Tabla 1: *Tolerancia de tiempo para los especímenes*

Edad de prueba	Tolerancia permitida
24 H	± 0.5 h o 2.1%
3 días	2 h o 2.8%
7 días	6 h o 3.6%
28 días	20 h o 3.0%
90 días	2 días 2.2%

*Nota:* Los especímenes se rompen dentro de la tolerancia de tiempo establecida. Adaptado de: ASTM, C39/39M. (2012) pp. 4. Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de hormigón.

- El diámetro de un espécimen cilíndrico o la dimensión mínima de la sección transversal de un espécimen rectangular debe ser por lo menos de tres veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso en el concreto como se define en la Terminología C 125. Cuando el tamaño máximo nominal del agregado grueso excede las 2 Pulg. [50 mm], la muestra debe ser tratada por tamizado por vía húmeda del concreto fresco a través de un tamiz de 2 Pulg. [50 mm] como se describe en la Práctica C 172, a menos que se estipule de otra manera. [20].

- Los moldes para especímenes o fijadores que están en contacto con el concreto deben ser hechos de acero, hierro fundido, u otro material no absorbente, no reactivo con el concreto que contenga cemento portland u otros cementos hidráulicos. Los moldes deben cumplir con las dimensiones y tolerancias especificadas en el método para los especímenes que requieran. Los moldes deben mantener sus dimensiones y forma bajo todas las condiciones de uso. La estanqueidad de los moldes durante el uso debe ser juzgada por su habilidad para mantener el agua vertida dentro de ellos. Los procedimientos de ensayo para estanqueidad están dados en la sección de Métodos de Ensayo para Alargamiento, Absorción y Estanqueidad de la Especificación C 470/C 470M. Cuando sea necesario para prevenir fugas entre las juntas, debe ser usado un sellador adecuado, tal como grasa pesada, arcilla para moldear o cera microcristalina. Deben ser provistos medios apropiados para sujetar firmemente las placas de base a los moldes. Los moldes reusables deben ser ligeramente recubiertos con aceite mineral o un material desencofrante no reactivo adecuado, antes de su uso. [20].
- El número de especímenes y el número de amasadas de ensayo dependen de la práctica establecida y la naturaleza del programa de ensayo. Usualmente se da una guía en el método de ensayo o especificación para los cuales los especímenes son realizados. Generalmente deben moldearse tres o más especímenes para cada edad de ensayo y condición de ensayo a menos que sea especificado de otra manera. Los especímenes que involucren una variable dada deben ser hechos de tres amasadas separadas mezcladas en días diferentes. Un número igual de especímenes para cada variable debe ser hecho en cualquier día dado. Cuando es imposible hacer como mínimo un espécimen por cada variable en un día dado, el mezclado de la serie completa de especímenes debería ser completada en tan pocos días como sea posible, y una de las mezclas debe ser repetida cada día como patrón de comparación. [20].

- “Se recomienda el pulimento de las extremidades con una tolerancia de planicidad de 0.04 mm”. [17]

- Considerar la presión ejercida al espécimen así:

Tabla 2: *Presión dentro de la prueba de las muestras*

	Coeficiente de variación	Rango aceptable o resistencia individual del cilindro	
		Cilindros (2)	Cilindros (3)
<b>150 por 300 mm [8 por 12 in]</b>			
Condición de laboratorio	2.4%	6.6%	7.8%
Condición de campo	2.9%	8.0%	9.5%
<b>100 por 200 mm [4 por 9 in]</b>			
Condición de laboratorio	3.2%	9.0%	10.6%

*Nota:* Coeficiente de variación y resistencia individual de la presión ejercida en los especímenes. Adaptado de: ASTM, C39/39M. (2012) pp. 6. Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de hormigón.

- Se ha encontrado que el coeficiente de variación de varios laboratorios para los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión de cilindros de 150 por 30 mm [6 por 12 in] es del 5.0%, por lo tanto, no se espera que los resultados de las pruebas realizadas correctamente por dos laboratorios en muestras preparadas a partir de la misma muestra de concreto difieran en más de 14% de la media. El resultado de una prueba de resistencia es promedio de dos cilindros probados a la misma edad. [19].

#### 5.4. Marco Histórico

Teniendo en cuenta que la exploración bibliográfica hasta el momento está conformada por temáticas de reutilización y/o manipulación de escombros de la construcción o similares abordados

en revistas nacionales e internacionales tales como: Revista de la Construcción, Revista Educación, Revista Ingenieros Universidad de Medellin, Kuxulkab, Building and Environment, Resources, Conservation and Recycling, entre otras. Se presenta a continuación el marco histórico.

El primer ejemplo significativo de construcción industrializada se remonta al siglo XVI, cuando Leonardo da Vinci recibió el encargo de planificar una serie de nuevas ciudades en la región de Loire. Su planteamiento consistió en establecer, en el centro y origen de cada ciudad, una 2 fábrica de elementos básicos que permitieran conformar a su alrededor un gran abanico de edificios. Dichas construcciones habían sido diseñadas previamente por él mismo para generar, de forma fluida y flexible, una gran diversidad de tipologías edificatorias con un mínimo de elementos constructivos comunes. [21].

En 1814, el químico francés Louis Vicat, establece las bases para la preparación de los aglomerantes artificiales (cementos artificiales), al calcinar mezclas dosificadas de arcilla y cal. En 1824, el maestro de obras Joseph Aspdin, patenta la fórmula del “Cemento Artificial Portland”. La escoria recocida de los hornos y su molienda daba un producto de fraguado lento, alta hidraulicidad y enorme resistencia. En 1845, se inició la producción industrial del Cemento Artificial Portland. Se cambia la dosificación caliza: arcilla y se alcanzan  $t^a > 1300^{\circ}\text{C}$  en los hornos. En 1861, se obtiene el reconocimiento nacional (Reino Unido) del Cemento Artificial Pórtland con la construcción de la red de alcantarillado de Londres. [22].

Como Varas afirma en Reino Unido se da inicio a lo que hoy conocemos como Cemento Portland el cual inicia con la calcinación de carbón, este se introducía por grandes hornos a temperaturas controladas que le permitieran calcinarse sin arden (Ceniza que funcionaba de aditivo). Uniéndose con el material margoso; dicho complemento ayudaba a la sílice y la alúmina

en el momento de reaccionar con la cal y de igual forma contribuía al fraguado del material. Una vez completada la calcinación, el producto se enfría para trasladarlo a molinos verticales los cuales lo convertirían en polvo fino que se tamizaría, embazaría y finalmente se almacena. Este proceso mejoro para finales de 1900 en tres aspectos: a) transporte de materia prima, b) los molinos pasan a ser horizontales y c) se utiliza la fuerza de vapor, de igual forma manipularon las magras para mejorar el producto final. [22].

La arquitectura en el mundo preindustrial se caracteriza por su ritmo lento de cambios y su sabia adaptación a la región natural (una construcción ligada a los materiales del lugar, al clima, a la orografía, a las necesidades básicas...) que, a la vez, es modificada por las tradiciones culturales (la costumbre, el régimen de propiedad de la tierra...). [23]. Es por ello por lo que la Revolución Industrial transforma profundamente los medios de producción, y con ellos, la sociedad. La formación de una mentalidad racional, la generalización del método científico, la acumulación de capital permitirá primero la organización de la manufactura y después la entrada imparable de la máquina; la confianza en el progreso impregna esos años tanto como la confianza en que una nueva arquitectura sólo podrá surgir de los nuevos principios estructurales: el hierro y un poco más tarde el hormigón armado. Por otro lado, y de una manera inexorable, las perspectivas de industrialización significan la sentencia de muerte de los procesos de construcción tradicionales, que más pronto o más tarde desaparecen. [23].

Con base a lo expuesto anteriormente es conveniente aclarar que:

La generación de residuos en los proyectos de construcción se da desde etapas muy tempranas y su terminación es casi infinita dado que, cuando la vida útil de una obra civil llega a su fin, se convierte en residuos a menos que se recupere, y sin embargo si se llega

a recuperar, esta recuperación no llega al 100%. [3]. Es por esto por lo que en la actualidad se busca la reutilización de los escombros provenientes de la construcción, Los materiales que se reciclan pueden tener propiedades físico-mecánicas que afecten la calidad, durabilidad, y resistencia del concreto que se produzca. Debe, por tanto, verificarse el contenido de material arcilloso y la densidad que se alcance al compactar estos materiales y contemplar estas variables en el diseño de la mezcla de concreto El esquema de las obras adelantadas dentro de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y durante el desempeño económico e industrial de las empresas constructoras se generan escombros. Actualmente, durante el desarrollo de una obra solo un porcentaje muy bajo de estos materiales se recupera. [5]

En conclusión, el entorno mundial marca la evolución de las tecnologías, es por ello que la globalización actual exige el desarrollo de procesos de control y disminución de residuos sobre todo los industriales, así como el diseño e implementación de nuevas tecnologías que incorporen dichos vertimientos como materias primas, por tal motivo es imperativo el seguir investigando sobre los escombros de la construcción para poder descubrir nuevos usos que permitan aportar al incremento de la reutilización de dicho material.

## **5.5. Estado del arte**

A continuación, se presenta el estado del arte que enmarca la investigación realizada.

Barrantes y Holguín representaron de forma gráfica la resistencia a la compresión en función del porcentaje de remplazo de ceniza volante logrando identificar que a mayor sustitución se incrementaba moderadamente la resistencia hasta un 20%, pero cuando este superaba el 30%

decaía; por lo cual las dosificaciones entre un 10% y un 30% de reemplazo presentaron mejores resistencias en comparación con la mezcla patrón debido a que la ceniza volante se distribuye proporcionalmente por los poros de la pasta de cemento y sus interfases lo que implica mayor durabilidad y resistencia a la compresión, lo anterior, debido a la reacción puzolánica que se produce entre la sílice, la alúmina de las cenizas volantes y la portlandita ( $CaCOH$ )<sub>2</sub> procedente de la hidratación de los silicatos ( $C_3S$  y  $C_2S$ ) del Clinker del cemento portland. [24]

Molina usó en su investigación un tipo de cemento (CEM I 42.5 R) suministrado por dos fabricantes. Holcim España desde su fábrica en Jerez proporciona un cemento de mayor finura de molido al cual se le denominó con la letra F y Cemex España desde la fábrica en Sant Feliú de Llobregat proporciona un cemento con menor finura de molido denominado con la letra G; a dichos cementos (Cemento F y Cemento G) se les realizaron diseños de mezcla con remplazos de ceniza volante para analizar su resistencia a la compresión [25], afirmando:

Al comparar los hormigones por el tipo de cemento, se observó que los hormigones fabricados con cemento F y ceniza en un 15% y 35% superan las resistencias de su referencia antes de los 7 días. Mientras que los hormigones que utilizaron un 50% superan a su referencia antes de los 28 días. Del mismo modo los hormigones fabricados con cemento G superan los valores de resistencia a compresión de su referencia antes de los 7 días en la mezcla que contienen 35% y 50%. Sin embargo, los hormigones que incorporan un 15% de ceniza obtuvieron mejores resultados desde los 28 días. [25]

Los hormigones de referencia fabricados con cemento F ofrecen valores de resistencia a compresión ligeramente superiores a los hormigones fabricados con cemento G. la incorporación de cenizas volantes como sustituto del cemento iguala o mejora la resistencia

a compresión de los hormigones a los 91 días y en un considerable número de casos en o antes de los 28 días. [25]

En otra investigación se determinó a partir de la resistencia a la compresión si los residuos agroindustriales (cascarilla de arroz, ceniza de cascarilla de arroz y cenizas de centrales térmicas) son favorables como adición en la elaboración de bloques de concreto estructural; dicho experimento realizado por Fuentes, Fragozo y Vizcaino con edades de 7, 28 y 45 días, con adiciones de 10%, 15% y 20% [26].

Con relación a la ceniza de cascarilla de arroz la resistencia a la compresión fue inversamente proporcional al aumento de las adiciones, excepto para las adiciones del 10% a los 28 días que presentaron mayor resistencia a la muestra patrón y donde el 20% de adición no cumplieron con los requerimientos comerciales. La cascarilla de arroz presento menores resistencias excepto para los bloques del 10% de adición a los 7 y 45 días donde se alcanzaron resistencias similares a la muestra patrón. Por último en probetas fabricadas con cenizas de las centrales térmicas lograron observar que a medida que aumentaba la edad la resistencia disminuía, exceptuando los siguientes casos que cumplen con los requisitos comerciales: a) Las adiciones del 20% presentaron mayor resistencia solo en los 28 y 45 días de edad b) La adición del 10% presentan mayor resistencia para los días 7 y 28; En fenómeno presentado en la adición de este último residuo agroindustrial puede obedecer al tamaño de las partículas del material las cuales facilitan la actividad química la cual incrementa la resistencia a la compresión [26].

Otro estudio usó el vidrio en diferentes presentaciones (molido, tamizado y granulado), en la misma Pulgarín y Cano basaron su investigación en el concreto adicionado con vidrio como un material aditivo, con el fin de observar el comportamiento de la resistencia a la compresión a los 14 y 20 días de edad y con aumentos del 3%, 5% y 7%. Logrando resaltar algunos hallazgos: a) El

vidrio molido logro mayor resistencia con el 3% de adición a los 14 días y con el 5% a los 28 días  
b) El vidrio tamizado logro mayor resistencia al 3% de adición en las dos edades c) El vidrio granulado logro mayor resistencia a los 28 días con la adición del 5% y con la del 7% para a los 14 días [27].

Independiente de los hallazgos anteriormente mencionados los autores lograron concluir:

Los resultados de resistencia a la compresión comparados entre la mezcla común y los tres tipos de aditivos empleados para el estudio: vidrio molido, vidrio tamizado y vidrio granular; el resultado final de la mezcla no alcanzó la resistencia de diseño calculada en 21 MPa. [27]

## 6. Metodología

A continuación se presenta la metodología llevada a cabo en esta investigación.

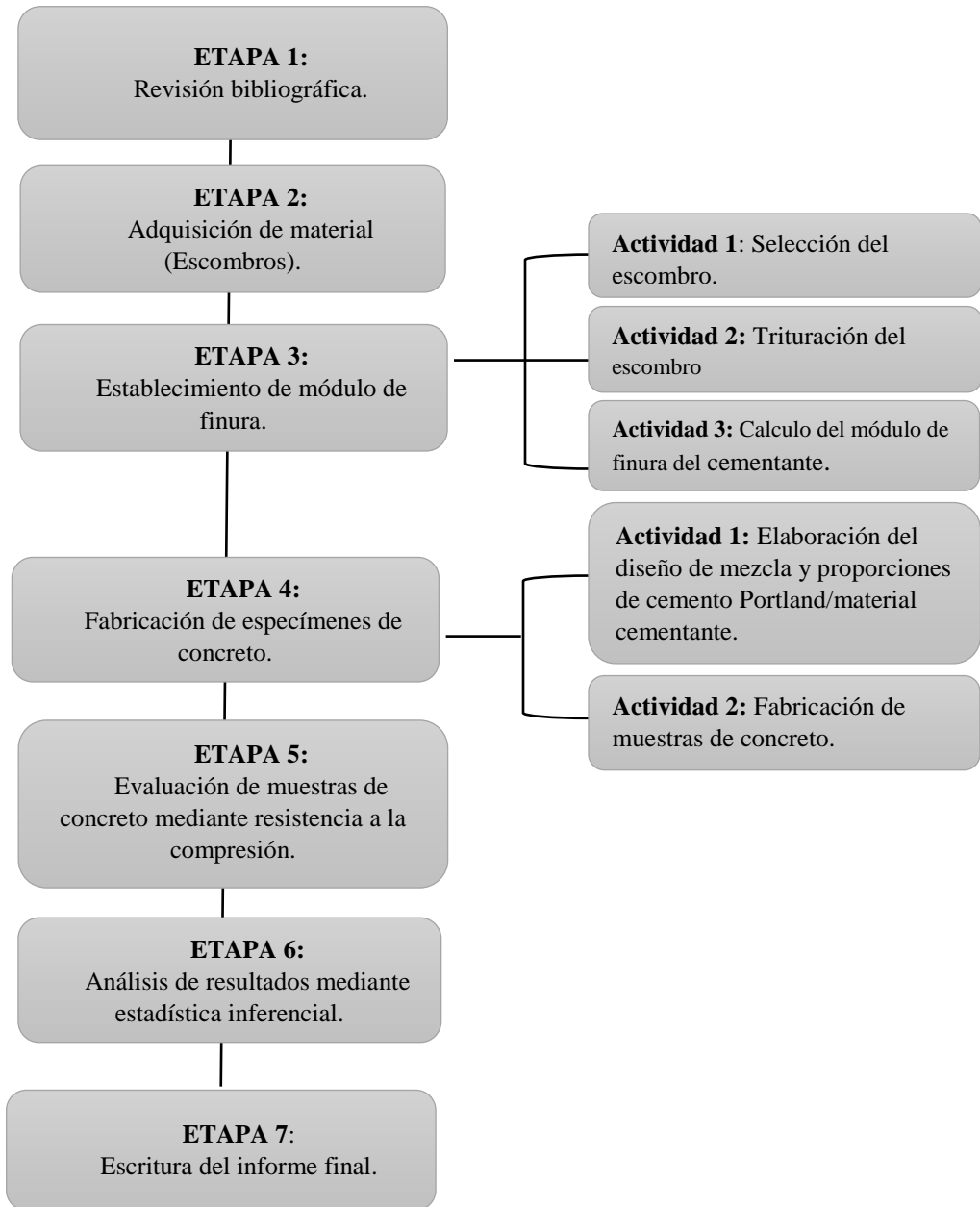


Figura 1: Metodología del Proyecto

### **6.1. Etapa 1: Revisión Bibliográfica**

Esta etapa se desarrolló durante todo el tiempo de ejecución del proyecto de investigación, permitiendo el desarrollo del marco referencial y del estado del arte que contribuye como soporte de los resultados obtenidos como afirma Vargas, se recopilaron los escritos y las investigaciones relativas al tema, identificando elementos, factores y aspectos pertinentes al estudio. [28]

La información fue recolectada en bases de datos como: Scielo, RIA (Repositorio Institucional Abierto), Repositorio Institucional de Cartagena, Kuxulkab (Revista de divulgación científica), Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Taylor & Francis Online, ScienceDirect, Repositorio Institucional Universidad Nacional de Cajamarca, Repositorio Institucional UNASAM, ASTM International, Portal de revistas académicas Universidad de Costa Rica, entre otras. Logrando ampliar el conocimiento sobre la problemática de estudio y sus variables.

### **6.2. Etapa 2: Adquisición de Material (Escombros)**

Esta etapa consistió en la recolección de los escombros provenientes de la construcción; para lo cual fue necesario obtener el material de una sola fuente y solicitarles que el mismo no hubiera sufrido un proceso drástico de compactación, garantizando el volumen requerido y evitando cualquier variación significativa de las características del material que pudieran afectar el cementante.

### 6.3. Etapa 3: Establecimiento de Módulo de Finura

Se estableció el módulo de finura para el escombros recolectado en la etapa 2, de tal forma que pudiera ser usado en la preparación de concreto convencional. A continuación se detalla cada una de las actividades ejecutadas:

**6.3.1. Actividad 1: Selección del escombros:** Para la selección del escombros se tuvo en cuenta lo sugerido por De los Santos quien afirma que en los escombros pueden surgir componentes orgánicos que trasfieran hongos o linos a los especímenes ocasionando reacciones internas que afectan la estabilidad, estética, vida útil y graves consecuencias de tipo estructural [6].

Al escombros proveniente de los desechos de la construcción se le realizó una depuración del pedrusco más voluminoso (aquel que se observaba más compactado y no permitía su trituración) ya que podría dificultar el proceso de pulverización, también se descartó el material con presencia agregado grueso visible y aquel con impurezas, como se observa en la figura 2.



*Figura 2:* Pedrusco voluminoso, impurezas y agregado grueso

**6.3.2. Actividad 2: Trituración del escombros:** En esta actividad se procedió a realizar la trituración de forma manual como se indica en la figura 3, usando un martillo, una lanilla y un tamiz. Cabe aclarar que fue necesario el uso de la lanilla para evitar que la superficie del martillo tuviera contacto con el escombros, mitigando así cualquier transferencia de partículas que alteraran los resultados. Una vez realizada la trituración del escombros se pasó por un tamiz logrando retirar la gravilla más voluminosa y obteniendo así un módulo de finura óptimo para el diseño de mezcla.



Figura 3: Proceso de obtención del módulo de finura

**6.3.3. Actividad 3: Cálculo del módulo de finura del cementante:** Conforme a la NTC 174, se procedió a establecer el módulo de finura del material cementante proveniente de escombros de la construcción, agregado fino (arena) y agregado grueso. El módulo de finura para los dos primeros materiales se estableció con ayuda de los tamiz No: 4 al 100 y el agregado grueso requirió del tamiz de 1” al No. 4.

El procedimiento fue igual para cualquiera de los casos, se ubicaron los tamices de forma vertical quedando el tamiz de mayor amplitud en la parte superior y el de menor en la parte inferior. En los tamices superiores se colocó la muestra y posterior se someten a un proceso de vibración; una vez terminado el vibrado se pesa el material retenido en cada tamiz y se calculan los porcentajes, determinando así los módulos de finura y tamaño nominal correspondientes.

Conforme a la norma se tuvo en cuenta que no debía pasar ni quedar retenido en el siguiente tamiz más del 45% del agregado y el módulo de finura del agregado fino debía estar entre 2,3 y 3,1 [29]. Adicional se realizaron las actividades concernientes a la obtención de las gravedades específicas y pesos unitarios de los agregados las mismas se ejecutaron conforme a las normas NTC 92, NTC 237 y NTC 176.

La información obtenido en la caracterización de los materiales correspondió a: granulometría de los agregados, módulo de finura de los agregados, densidad aparente de los agregados, absorción de los agregados, masa unitaria del triturado, humedad natural y densidad del cemento.

#### **6.4. Etapa 4: Fabricación de Especímenes de Concreto**

En esta etapa se elaboraron 48 especímenes de concreto con cemento Portland y el material cementante obtenido en las etapas anteriores. A continuación se detallan las actividades realizadas en esta etapa de la investigación:

**6.4.1. Actividad 1: Elaboración del diseño de mezcla y proporciones de cemento**

**Portland/material cementante:** Según el método ACI 211 y teniendo en cuenta la caracterización del cemento y del material cementante, se procedió a determinar la relación agua cemento conforme a la ASTM C 143 para la cual se estableció una consistencia media plástica tal como lo declara el Ingeniero Gerardo en su investigación [30].

La consistencia plástica es la que tiene un asentamiento entre 50 a 100 mm, es decir una vez se retira el cono de Abrams la mezcla podrá caer hasta 100 mm de su punto de partida ya que si supera dicha medida se considera fluida y si permanece sobre los 50 mm se considera seca. En la figura 4 se presenta el asentamiento de la mezcla el cual fue de 70 mm de la presente investigación.



*Figura 4:* Prueba de asentamiento

El diseño de la mezcla según ACI 211 permite realizar una combinación favorable de cemento Portland y material cementante; garantizando el control del diseño y aportantes a la cohesión y consistencia del compuesto tal como lo afirma Diaz en sus investigaciones [31]. Es por esto por lo que se manejó una relación agua cemento de 0,6 para el desarrollo del diseño de mezcla.

Con base en la información anterior se realizó el diseño de mezcla así:

- a) **Cálculo de contenido de cemento (c):** Es la cantidad de cemento por unidad de volumen la cual se obtiene a partir de la relación  $a/c$ , la misma se calcula así:

$$c = \frac{a}{a/c}$$

Donde:

$a$  = Volumen de agua (el obtenido en la prueba de asentamiento)

$c$  = Volumen de cemento (el obtenido en la prueba de asentamiento)

- b) **Estimación del contenido de grava (b):** Se buscó que los agregados utilizados en el desarrollo de la presenta investigación manejaran la misma granulometría con el fin de mantener sus características en todos los especímenes. Para la estimación se utilizó la siguiente ecuación:

$$b = \frac{b}{b_0} * b_0$$

Donde:

$b_0$  = Masa unitaria compactada/ densidad de la grava

$b$  = Volumen absoluto del agregado por volumen unitario de cemento

$\frac{b}{b_0}$  = Volumen seco y compactado de agregado grueso por volumen unitario de concreto

- c) **Estimación del contenido de arena (VA):** Teniendo en cuenta que el diseño de mezcla se realiza para un metro cúbico se procedió a sumar todas las estimaciones calculadas anteriormente y restarlas al metro cubico; manejando la siguiente formula:

$$VA = 1 - (\text{Vol. Agua} + \text{Vol. Cemento} + \text{Vol. Grava})$$

Se elaboraron cuatro mezclas, una de concreto simple y tres con remplazos de cemento Portland por material cementante de escombros de 10%, 15% y 20%. La mezcla de concreto simple fue la mezcla original y correspondió al 0% de remplazo la cual permitió evaluar los cambios de las propiedades mecánicas del concreto respecto a las modificaciones.

Los resultados del diseño se encuentran en el numeral 7.2.

**6.4.2. Actividad 2: Fabricación de muestras de concreto:** Para la fabricación de las muestras se siguió la norma NTC 1377, la cual permitió ejecutar la preparación de los materiales, la mezcla del concreto y curado de los especímenes los cuales se elaboraron y fallaron en condiciones de laboratorio. Cabe aclarar que en total se realizaron cuatro diseños de mezcla que corresponden a los remplazos anteriormente declarados (0%, 10%, 15% y 20%), para cada diseño de mezcla se calcularon las cantidades para 15 especímenes equivalentes a 12 especímenes a fallar y 3 de más correspondientes al posible residuo que queda en el trompo y carretilla.

La caracterización del agregado grueso demostró que dicho material contenía lodo por lo tanto antes de iniciar la fabricación de los especímenes fue necesario lavar el material quedando libre de impurezas tal como lo muestra la figura 5; de igual forma se dejó secar bajo techo a temperatura ambiente por una semana. Respecto al agregado fino solo se requirió el secado a temperatura ambiente por la misma duración de tiempo.



*Figura 5: Agregado grueso lavado*

Una vez se secaron los agregados se procedió con la fabricación de los especímenes, la cual inició con la preparación de las probetas de PVC , ver figura 6; las mismas cumplieron los requisitos de la NTC 1377 como “no absorbentes y no reactivas al concreto; manteniendo sus dimensiones y forma bajo las condiciones de uso” [33]; se tapó la perforación que tiene cada molde en su base y se engrasó con aceite evitando que el concreto se adhiera.



*Figura 6A: Probeta de PVC*

*Figura 6b: Aceite para engrasar probeta*

*Figura 6: Alistamiento de probetas*

El diseño de mezcla indicó las dosificaciones por tanto, como primer paso se procedió a pesar los materiales (cemento Portland, material cementante, agregados y agua), posterior se prepara el trompo, mezcladora motorizada de tambor giratorio y mezcladora inclinable. En dicho equipo se

depositaron los materiales en el siguiente orden: agregado fino, cemento o material cementante, agregado grueso y por último el agua; se procedió al mezclado mecánico por 8 min, por último se giró e inclino el trompo para verter la mezcla en la carretilla y proceder al llenado de las probetas.

La fabricación de un espécimen consistió en llenar 1/3 de la capacidad del cilindro con la mezcla de hormigón, posterior se compacto por medio de 25 apisonamientos realizados con la varilla compactadora y evitando tocar la probeta, el vibrado se realizó por medio de varios golpes exteriores a la probeta ejecutados con el mazo, dicho procedimiento se llevó a cabo tres veces más logrando dejar llena y compactada la probeta; esta actividad se repitió para los 48 especímenes.

Los especímenes elaborados se dejaron fraguar en las probetas durante 24 horas, una vez cumplido este tiempo se procedió a desmoldar, para ello se retira el tapón de la base y mediante aire a presión suministrado por un compresor se retira el espécimen del molde plástico. Posteriormente, se marcaron las muestras según la dosificación y se colocó la fecha en la que debía ser fallado. .

Los especímenes desmoldados y marcados se llevaron a la zona de curado tal como lo indica la norma NTC 1377:

A menos que sea especificado de otra forma, todos los especímenes deben ser curados en húmedo a  $73.5 \pm 53.5^{\circ}\text{F}$  [ $23.0 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ ] desde el tiempo de moldeo hasta el momento del ensayo. Como se aplica al tratamiento de los especímenes desmoldados, el curado húmedo significa que los especímenes de ensayo deben mantener agua libre sobre su superficie completa en todo momento [33].

Teniendo en cuenta la información anterior se consolida la figura 7, la cual representa por medio de imágenes las actividades realizadas para ejecutar la fabricación de muestras de concreto.



Figura 7: Fabricación de especímenes

### **6.5. Etapa 5: Evaluación de Muestras de Concreto Mediante Resistencia a la Compresión**

La presente etapa se desarrolló conforme a lo indicado en la norma NTC 673 Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto:

Este método de ensayo consiste en la aplicación de una carga axial de compresión a cilindros moldeados o a núcleos a una velocidad que está dentro de un intervalo prescrito hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión del espécimen se calcula dividiendo la máxima carga alcanzada durante el ensayo entre el área de la sección transversal del espécimen [34].

Se retiraron los especímenes de la zona de curado y conforme a la norma NTC 673 se realizó una inspección visual, verificando que sus bases fueran planas de lo contrario se deberían esmerilar para ser fallados; por último se procedió al peso individual de los especímenes.

Verificando que las bases del espécimen estuvieran limpias se ubican las almohadillas de neopreno entre la prensa y el espécimen de igual forma se comprueba que el indicador de la prensa este en cero; se mantuvo una velocidad constante de 0,10 mm/s. Dicho equipo cuenta con un sensor que percibe la falla del espécimen interrumpiendo la aplicación de carga axial, en este momento se tomó el dato de resistencia que indica la pantalla de la prensa, por último se retiró el espécimen y se identifica el tipo de fallo conforme al numeral 7,6 de la NTC 673.

En la ejecución de la etapa 5 se recolectó evidencia fotográfica, con la cual se consolida la figura 8, la misma permite visualizar cada actividad ejecutada en la evaluación de muestras de concreto mediante resistencia a la compresión.



Figura 9A: Retiro de la zona de curado



Figura 9B: Peso de espécimen



Figura 9C: Ubicación entre los apoyos



Figura 9D: Fallo del espécimen



Figura 9E: Toma dato de resistencia



Figura 9F: Clasificación del tipo de fallo

Figura 8: Prueba de resistencia a la compresión

## 6.6. Etapa 6: Análisis de Resultados Mediante Estadística Inferencial

Empleado un software estadístico se realizó el diseño experimental factorial multinivel. De cada factor se desprendieron más de dos niveles, así: el factor tiempo presentó tres niveles (3, 7, 28 días) y el factor de reemplazo presentó cuatro niveles (0%, 10%, 15% y 20% de material cementante); con este diseño experimental se logró analizar las relaciones entre los factores y la variable de respuesta plateada como es la resistencia a la compresión obtenida en los especímenes fallados.

La hipótesis de la presente investigación recae en el remplazo de cemento Portland de uso general por material cementante proveniente de escombros de la construcción, el cual modifica o no la resistencia a la compresión del concreto.

$$H_0: \mu_0 = \mu_{10} = \mu_{15} = \mu_{20}$$

$$H_1: \mu_0 \neq \mu_{10} \neq \mu_{15} \neq \mu_{20}$$

Donde:

$H_0$ : Todas las proporciones son iguales

$H_1$ : Todas las proporciones son diferentes

Para analizar las diferencias significativas entre los factores se procedió a extraer del software estadístico la siguiente información: la ANOVA, el diagrama de medias, tabla de diferencias significativas, valor p, diagrama de cajas y bigotes que permitió comparar distribuciones, y por último el diagrama de Pareto que contribuyó a identificar la relación más óptima. Logrando concluir a partir de sus análisis cual remplazo podría ser factible en el uso de cementos convencionales.

## **6.7. Etapa 7: Escritura del Informe Final**

La etapa final comprendió la redacción, corrección, recopilación de soportes (tablas, gráficos, fotos); soportando los resultados obtenidos en cada actividad ejecutada y brindando una base sólida a la sustentación del mismo, evaluación de resultados, conclusiones y la misma presentación del escrito.

## **7. Resultados y Análisis de Resultados**

A continuación se presentan los resultados alcanzados de las pruebas de asentamiento, caracterización de agregados, prueba de resistencia a la compresión. Los resultados corresponden al consolidado de cada cálculo y actividad realizada en las etapas experimentales.

### **7.1. Caracterización de Agregados**

Cumpliendo los requisitos establecidos en las normas NTC 92, NTC 176, NTC 221 y NTC 237 se ejecutó la caracterización de los agregados con el objetivo de determinar las propiedades de cada material (gravedad, peso, porcentaje de absorción, vacíos, etc.) claves en el diseño de la mezcla.

Tabla 3: *Gravedades Especificas*

	A. Fino	A. Grueso
Real ( $kg/m^3$ )	2,79	2,70
Aparente ( $kg/m^3$ )	2,75	2,58
Aparente SSS	2,76	2,62
Peso unitario suelto ( $kg/m^3$ )	1544	1453
Peso unitario compactado ( $kg/m^3$ )	1701	1573
Absorción %	0,48	1,67
Porcentaje de vacíos %	38,42	40
Materia orgánica:	Fino 2	Icontec 127

Adicional se determinaron los módulos de finura para los agregados y el material cementante, para este último se adiciona la densidad.

Tabla 4: *Caracterización del material*

<b>Peso Especifico</b>	
Cemento de uso general ( $kg/m^3$ )	3,00
Material Cementante ( $kg/m^3$ )	2,15
<b>Módulo de Finura</b>	
Modulo finura material cementante	2,9
Modulo finura agregado fino	3
Tamaño máximo agregado grueso	1"

## 7.2. Diseño de Mezcla

Como resultado de la actividad descrita en el numeral 6.4.1 se presenta a continuación el diseño de mezcla:

Tabla 5: *Diseño de mezcla*

Asentamiento(mm)	50 - 100
Relación agua cemento	0,6
Volumen molde	0,001647

CONSTITUYENTE	MASA (kg) PARA 1 m <sup>3</sup>	MASA (kg) 1 PROBETA	MASA (Kg) 15 PROBETA
Agua	250,000	0,412	6,176
Cemento	417,000	0,687	10,302
Ag. Grueso	942,000	1,551	23,272
Ag. Fino	676,500	1,114	16,713

CONSTITUYENTE	Reemplazo 10%	Reemplazo 15%	Reemplazo 20%
Agua	6,176	6,176	6,176
Cemento	9,272	8,757	8,242
Material cementante	1,030	1,545	2,060
Ag. Grueso	23,272	23,272	23,272
Ag. Fino	16,713	16,713	16,713

### 7.3. Resistencia a la Compresión

Los resultados obtenidos en la etapa de evaluación de especímenes se presentan en la Tabla 6:

Tabla 6: *Resultados obtenidos en la evaluación de especímenes*

Reemplazo	Edad (días)	Resistencia a la compresión (Mpa)
0%	3	11,02
	7	15,85
	28	19,50
10%	3	10,28
	7	15,21
	28	17,38
15%	3	9,44
	7	14,14
	28	17,30
20%	3	6,66
	7	8,62
	28	12,26

El concreto simple (reemplazo 0%) logra una resistencia de 20 Mpa a los 28 días de edad, por contrario las réplicas con reemplazos del 10%, 15% y 20% obtuvieron pérdidas de resistencia a la compresión del 10,87%, 11,2% y 37,13% respectivamente, este comportamiento se puede observar en la figura 11 en la cual se evidencia la diferencia significativa que mantiene el reemplazo del 20% con respecto a la original.

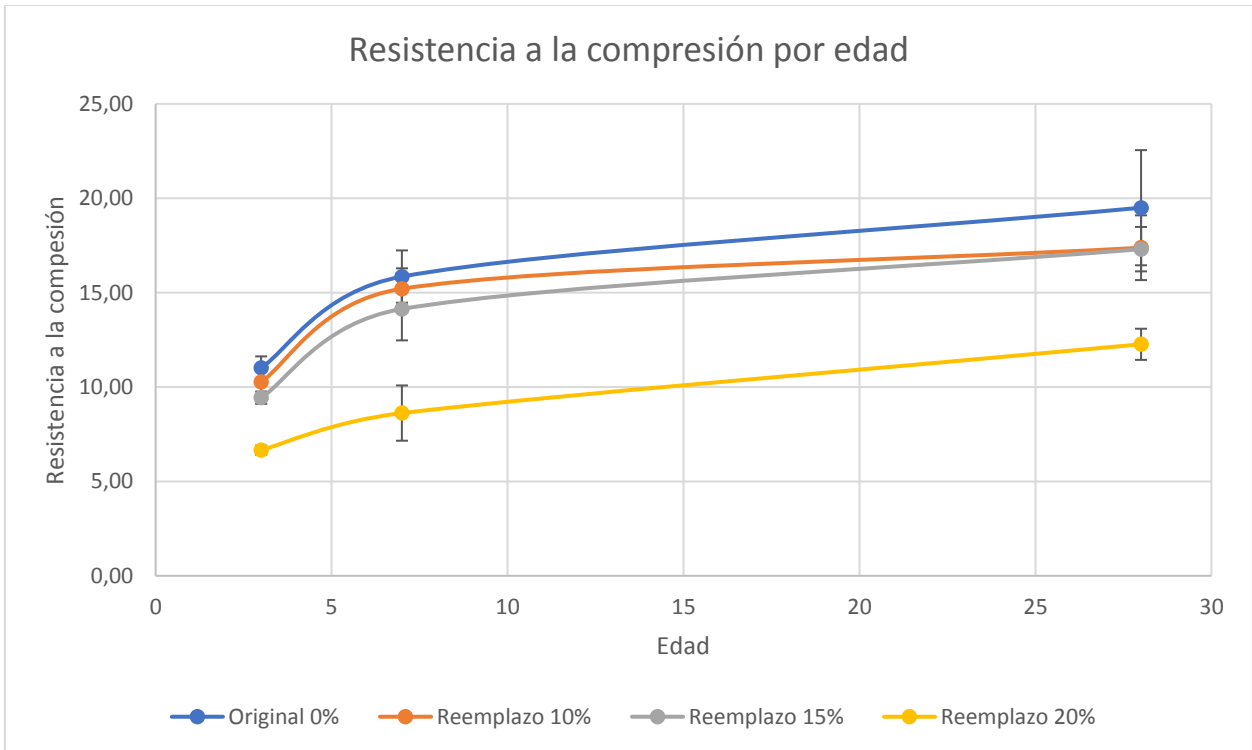


Figura 9: Resistencia a la compresión por edad

De igual forma se pudo observar en la figura 11 que los reemplazos del 10% y 15% no tienen diferencias significativas con respecto a la original en las tres edades, ya que mantuvieron sus resistencias entre el 89% y el 90% pudiendo ser reemplazos viables para el presente estudio. Ahora bien Barrantes y Holguín hacen hincapié en sus investigaciones donde los reemplazos del 10% y 30% de ceniza volante lograron resistencias satisfactorias a lo largo de sus edades debido a la reacción puzolánica que se produce entre la sílice y la alúmina de las cenizas, proveniente de la hidratación de los silicatos y del Clinker del cemento Portland. [25], pero para el material

cementante utilizado en el desarrollo del presente estudio se podría estar afirmando que dicho material ya reacciona en su totalidad por ello la hidratación que brinda al Clinker es menor y aun así se logra mantener una resistencia máxima del 86% viable para diseños no estructurales (pisos, andenes, muros) contrario a Fuentes, Fragozo y Vizcaíno que realizaron remplazos del 10% con ceniza de cascarilla de arroz, cascarilla de arroz y ceniza de las centrales térmicas, obteniendo pérdidas en sus especímenes de hasta un 34% de resistencia a la compresión, siendo no aptos para su comercialización ya que no cumplen con las NTC 4026 y NTC 4076, [27].

Lo ideal para un material cementante, es que este contribuya a las reacciones químicas y físicas del hormigón o que no produzcan pérdidas significativas en las mismas, es por ello que se seleccionan materiales que brinden hidratación a la reacción puzolánica como lo afirma Pulgarín y Cano que lograron resaltar en su investigación los efectos de las características del material adicionado, logrando determinar el comportamiento de la resistencia a la compresión, como fueron las adiciones del 5% en los tres estados del vidrio (tamizado, molido y granulado) con pérdidas de resistencia en un 7% y desde una vista general en todas las adiciones del 3% resalto el vidrio tamizado el cual gano un 3% de resistencia [28].

#### **7.4. Análisis Mediante Estadística Inferencial**

Con el fin de validar la información del numeral 7.3 se presenta a continuación el análisis estadístico con un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%, para sus efectos en la tabla 7 se exponen las convenciones que manejara el software estadístico. Siendo los criterios aceptados para la representación de los efectos (reemplazo y días). Es decir, el día 3 se reflejará en el análisis estadístico como el -1, el día 7 como 0 y el día 28 como 1, de igual forma para los remplazos, siendo el concreto original el 0% se representará en el análisis estadístico como el -1 y

así sucesivamente, por último, la resistencia a la compresión se representará como  $F'c$ ; esto con la finalidad de obtener una mayor comprensión de las gráficas y tablas presentadas.

Tabla 7: Conversiones estadísticas del Software

Convención Estadística	Día	Reemplazo	Convención Estadística
-1	3	10%	-0,33
0	7	15%	0,33
1	28	20%	1
		0%	-1

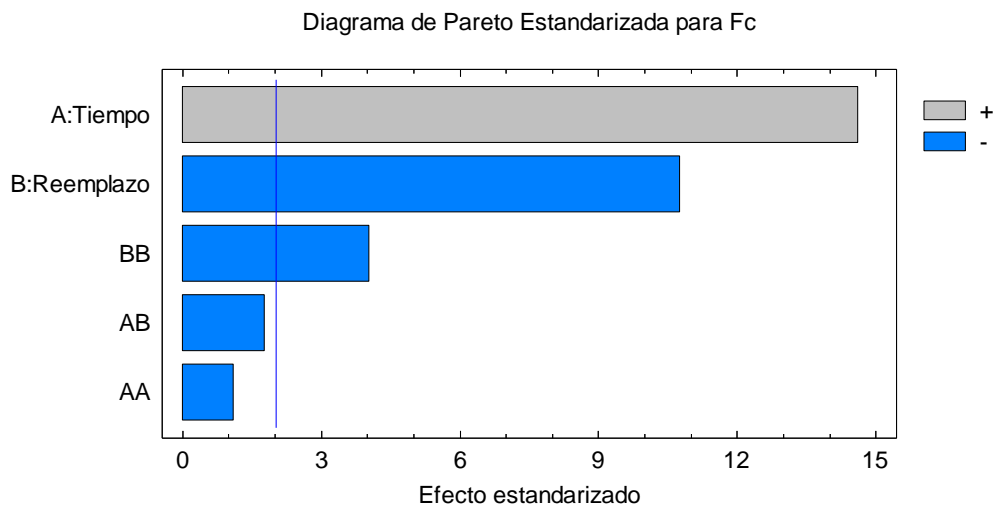
**7.4.1. Análisis de la varianza:** Para observar la significancia estadística se presenta en la Tabal 8 el análisis de la varianza con respecto a la resistencia a la compresión. Para el valor P se puede observar que no hay diferencias significativas respecto al tiempo y a los remplazos con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 8: Análisis de Varianza para  $F'c$

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tiempo	422,169	1	422,169	213,89	0,0000
B:Reemplazo	228,053	1	228,053	115,54	0,0000
AA	2,39086	1	2,39086	1,21	0,2778
AB	6,16618	1	6,16618	3,12	0,0850
BB	32,1933	1	32,1933	16,31	0,0002
bloques	14,6371	3	4,87902	2,47	0,0760
Error total	76,9765	39	1,97376		
Total (corr.)	782,586	47			

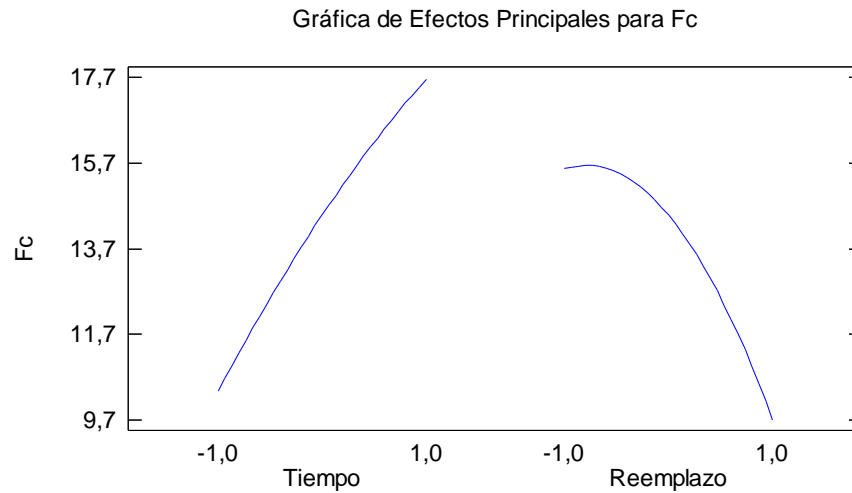
R-cuadrada = 90,1638 por ciento  
 R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 88,9929 por ciento  
 Error estándar del est. = 1,4049  
 Error absoluto medio = 0,98592  
 Estadístico Durbin-Watson = 2,35382 (P=0,7886)  
 Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,197732

**7.4.2. Diagrama de Pareto:** En el diagrama de Pareto correspondiente a la figura 11, se pudo comprobar que al incrementar la edad de los especímenes la resistencia aumenta resultando un efecto positivo (A Tiempo), caso contrario se presenta cuando el remplazo incrementa ya que la resistencia decae siendo un efecto negativo (B. Reemplazo). Es decir que el grafico de Pareto demostró la influencia significativa que tienen los efectos (edad y remplazos) sobre la resistencia a la compresión ( $F'c$ ) que es la variable de respuesta.



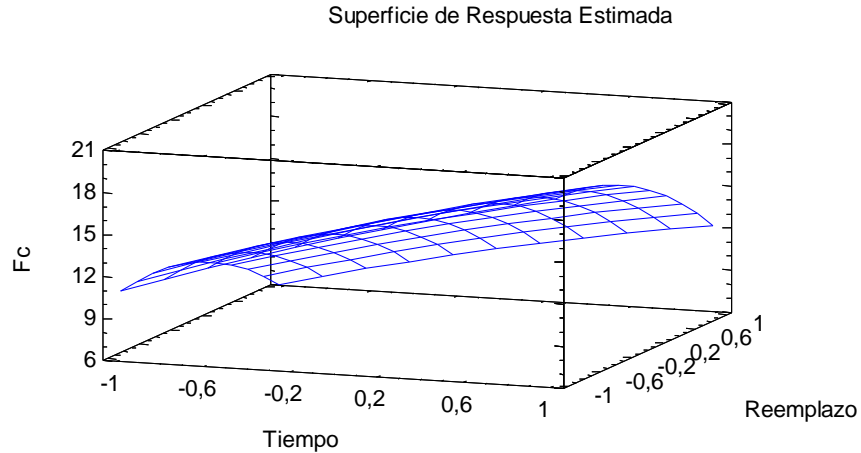
*Figura 10:* Diagrama de Pareto

En la figura 12 se representa la evolución del tiempo y de los reemplazos de los especímenes desde el día 3 hasta el día 28, observando como la resistencia a la compresión ( $F'c$ ) incrementa desde el -1 considerado como el día 3 y el 1 considerado como el día 28, caso contrario se presenta con los reemplazos donde la muestra original presenta la mayor resistencia y al realizar la adición del 20% decae considerablemente.



*Figura 11:* Efectos principales

El diagrama de superficie de respuesta que se presenta en la figura 13 permite ver en un plano 3D la evolución de los dos efectos vitales declarados anteriormente. En la cara frontal (Tiempo) se pudo observar cómo los especímenes aumentan su resistencia a partir del incremento en su edad y en su cara lateral (Reemplazo) se logró afirmar que la muestra original fue la que presentó la mayor resistencia pero al realizar las adiciones decae la resistencia, siendo el reemplazo del 20% el que presenta mayor pérdida.



*Figura 12:* Superficie de respuesta

**7.4.3. Grafica de medias:** Con el fin de comprobar estadísticamente las diferencias significativas entre los reemplazos se presenta en la figura 14 la gráfica de medias, logrando observar que la muestra original (-1) y los reemplazos del 10% (-0,333) y 15% (0,33) se traslapan entre sí por ende no existe diferencias significativas entre ellas. Estos reemplazos son viables, pero para los efectos se recomienda el uso de la adición que presenta menor pérdida y en diseños no estructurales de lo contrario se debe sobre diseñar para compensar la pérdida de resistencia.

Estas adiciones logran conservar una resistencia del 89% con respecto a la original convirtiéndolas en opciones viables para la construcción. El reemplazo del 10% tiene una pérdida del 11% de la resistencia, declarándose la menor pérdida del presente estudio y el más factible para su uso ya que contribuye en la reducción de escombros y de la producción de cemento, caso contrario se presenta con el reemplazo del 20% (1) el cual mantuvo diferencia significativas y una pérdida considerable del 37,13% en la resistencia a la compresión convirtiéndolo en no apto para

su uso, cabe aclarar que no se descarta el uso del remplazo del 15% ya que conservo el 88% de su resistencia.

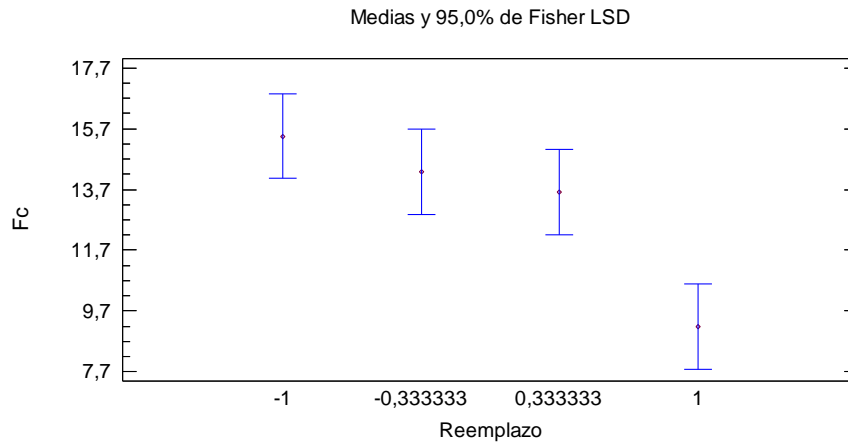


Figura 13: Grafica de medias

La prueba de múltiples rangos presentada en la tabla 9 comprueba a partir de las medias la homogeneidad entre el concreto original (0%) y los remplazos (10% y 15%)

Tabla 9: Pruebas de Múltiple Rangos para F'c por Reemplazo

Método: 95,0 porcentaje LSD

Reemplazo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1	12	9,18083	0,98411	X
0,333333	12	13,6242	0,98411	X
-0,333333	12	14,29	0,98411	X
-1	12	15,4575	0,98411	X

## 8. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en la evaluación de muestras de concreto mediante resistencia a la compresión y del análisis estadístico declarado entre la muestra original y los remplazos se concluye:

A partir de la selección y trituración del escombros se estableció que el módulo de finura para el material cementante proveniente de escombros de la construcción es de 2.9, el cual fue similar a la del cemento Portland. Esta característica permitió adquirir mayor área superficial, de tal forma que contribuyó con la hidratación del hormigón, ya que al ser fino el material cementante, probablemente favoreció a disminuir las diferencias significativas entre los remplazos.

Se definieron cuatro proporciones así: 0% concreto original, reemplazo del 10%, reemplazo del 15% y reemplazo del 20% de material cementante proveniente de escombros de la construcción. A partir de los resultados de la prueba de resistencia a la compresión se obtuvo que la proporción que ofreció mejores resultados fue la del 10% de reemplazo respecto al concreto original, manteniendo el 90% de la resistencia a la compresión.

El diagrama de Pareto del análisis estadístico demostró que al aumentar la proporción de material cementante disminuye la resistencia a la compresión del concreto, de igual forma el diagrama de medias confirmó que no hay diferencias significativas entre los remplazos del 10% y 15%, es decir, que las proporciones mantuvieron la resistencia a la compresión, esto debido a las propiedades físicas que se preservaron en el establecimiento del módulo de finura del material en la etapa de selección y trituración, logrando ser apto para su uso.

La hipótesis nula  $H_0$  se rechaza, ya que la Razón-F fue mayor que el Valor-P, lo anterior indica que no hay diferencias significativas entre las medias de las proporciones de concreto simple, reemplazo de 10% y de 15%, pero si hubo diferencia significativa con la dosificación de 20% respecto a las otras mezclas.

A partir de la superficie de respuesta se determinó que cada reemplazo de material cementante proveniente de escombros de la construcción influyó en la resistencia a la compresión del concreto, dicho comportamiento mecánico se mantuvo en un 90% para los reemplazos del 10% y 15% siendo homogéneos con el concreto original, conforme se evidenció en la prueba de múltiples rangos. Se descarta el reemplazo del 20% ya que es no homogéneo respecto a las otras dosificaciones con una pérdida de resistencia de 37% convirtiéndolo en no apto para su uso.

## 9. Recomendaciones

Al concluir el presente trabajo de investigación se declara la siguiente recomendación:

Es aconsejable conocer los costos asociados a los diversos procesos que requirió el desarrollo del presente proyecto de investigación, con el fin de conocer el valor real de la ejecución del proyecto sobre todo de la etapa de trituración asociada a la pulverización del material cementante proveniente de escombros de la construcción. Esta información es vital para conocer el valor real que tendrá la fabricación del concreto alternativo.

### Bibliografía

- [1] C. Simonnet, Hormigón: Historia de un material, San Sebastián, España: Nerea, 2009.
- [2] Á. Chávez Porras, A. M. Mejía Cardona y Ó. J. Bernal López, «Análisis de información sobre el manejo y gestión de escombros a nivel nacional e internacional,» 2010.
- [3] J. C. Aldana Barrera y A. Serpell Bley, «Temas y tendencias sobre residuos de construcción y demolición: un metaanálisis,» *Revista de la Construcción*, vol. 11, n° 2, pp. 04-16, 2012.
- [4] R. A. López, M. Masckauchan, C. A. Di Salvo, J. L. Verga y A. Graich, «Caracterización tecnológica de morteros con escombros de albañilería molido,» *Proyecciones*, vol. 11, n° 1, pp. 91-99, 2013.
- [5] C. Venegas Pérez , M. Elijaiek Urzola y R. E. Ucros Oyola , «Aprovechamiento de escombros como agregado grueso para la fabricación de adoquines estándar,» Cartagena, Colombia, 2015.
- [6] N. Méndez de los Santos, C. Rodríguez Jiménez, N. Cruz Gómez y J. R. Laines Canepa, «Los escombros como agregados en la industria de la construcción,» *Kuxulkab*, vol. 16, n° 30, pp. 40-45, 2014.
- [7] Á. Chávez Porras, N. L. Guarín Cortes y M. C. Cortes Duarte, «Determinación de propiedades físico-químicas de los materiales agregados en muestra de escombros en la ciudad de bogotá D.C.,» *Revista ingenierías universidad de Medellín*, vol. 12, n° 22, pp. 45-57, 2013.
- [8] M. Tonda, H. F. Begliardo y M. C. Panigatti, «Reciclado de hormigon sin preselección en origen,» San Miguel de Tucumán, Argentina, s.f..
- [9] C. Clark, J. Jambeck y T. Townsend, «A review of construction and demolition debris regulations in the United States,» *Critical reviews in environmental science and technology*, vol. 36, n° 2, pp. 141-186, 2006.
- [10] L. L. Ekanayake y G. Ofori, «Building waste assessment score: design-based tool,» *Building and environment*, vol. 39, n° 7, pp. 851-861, 2004.
- [11] W. Zhao , V. S. Rotter y R. B. Leefink, «Evaluation of the economic feasibility for the recycling of construction and demolition waste in China—The case of Chongqing,» *Resources, conservation and recycling*, vol. 54, n° 6, pp. 377-389, 2009.
- [12] J. D. Moreno, «Argos - Materiales cementantes suplementarios y sus efectos en el concreto,» 2018. [En línea]. Available:

<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/efectos-de-cementantes-suplementarios>.  
[Último acceso: 19 01 2020].

- [13] (s.f), «Relación agua - cementante,» [En línea]. Available: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/8650/Capitulo2.pdf>. [Último acceso: 19 01 2020].
- [14] J. I. Tobon, «Morteros y concretos de cemento alternativos, una posible solución en la construcción de obras de infraestructura, Hermes,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.hermes.unal.edu.co/pages/Consultas/Proyecto.xhtml?idProyecto=18771#responsable>. [Último acceso: 19 01 2020].
- [15] M. L. Salcedo Barrera , «Concreto de alto desempeño en Colombia,» Bogotá, Colombia, 2006.
- [16] S. Solís y H. Ezequiel, «Influencia del aditivo sika I y agregado chancado en la resistencia a la compresión y propiedades físicas en concreto de baja permeabilidad,» 2017.
- [17] B. Kerkhoff, W. Panarese, J. Tanesi y S. Kosmatka, Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Illinois, EE.UU: Portland Cement Association, 1992.
- [18] G. Misael y W. Tello, «Influencia del vidrio molido en la resistencia a la compresión del concreto y costos de fabricación, comparado con el concreto convencional, Barranca-2016,» Huaraz, Perú, 2017.
- [19] NTC, «Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio, NTC 1377,» 1994. [En línea]. Available: [https://www.academia.edu/32426842/NORMA\\_T%C3%89CNICA\\_NTC\\_COLOMBIANA\\_1377\\_INGENIER%C3%8DA\\_CIVIL\\_Y\\_ARQUITECTURA.\\_ELABORACION\\_Y\\_CURADO\\_DE\\_ESPEC%C3%8DMENES\\_DE\\_CONCRETO\\_PARA\\_ENSAYOS\\_DE\\_LABORATORIO](https://www.academia.edu/32426842/NORMA_T%C3%89CNICA_NTC_COLOMBIANA_1377_INGENIER%C3%8DA_CIVIL_Y_ARQUITECTURA._ELABORACION_Y_CURADO_DE_ESPEC%C3%8DMENES_DE_CONCRETO_PARA_ENSAYOS_DE_LABORATORIO). [Último acceso: 04 01 2020].
- [20] ASTM, «Metodo de prueba estándar para la resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de hormigón, ASTM C39/C39M-12,» 2012. [En línea]. Available: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C39C39M-12-SP.htm>. [Último acceso: 07 05 2019].
- [21] ASTM, «Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de hormigón, ASTM C192/C192M-06,» 2006. [En línea]. Available: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C192C192M-06.htm>. [Último acceso: 07 05 2019].
- [22] C. Escrig Pérez, «Evolución de los sistemas de construcción industrializados a base de elementos prefabricados de hormigón».

- [23] M. J. Varas , M. Álvarez de Buergo y R. Fort González, «Piedras artificiales: morteros y hormigones. El cemento como máximo representante de estos materiales de construcción,» 2007.
- [24] R. Graus, La cubierta plana, un paseo por su historia, Catalunya, Barcelona, España: Texsa, 2005.
- [25] J. A. Barrantes Villanueva y R. C. Holguin Romero, «Influencia del porcentaje de reemplazo de ceniza volante por cemento sobre la resistencia a la compresión y absorción en la fabricación de adoquines de transito liviano.,» Trujillo, Perú, 2015.
- [26] O. Molina Bas, «Influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Portland en la durabilidad del hormigon [Tesis doctoral],» Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, España, 2015.
- [27] N. Fuentes Molina, O. I. Fragozo Tarifa y L. Vizcaino Mendoza, «Residuos agroindustriales como adiciones en la elaboración de bloques de concreto estructural,» *Ciencia e ingeniería neogranadina*, vol. 25, nº 2, pp. 99 - 116, 2015.
- [28] J. D. Cano Cano y C. M. Cruz Pulgarin, «Análisis de mezclas de concreto con proporciones de vidrio molido, tamizado y granular como aditivo, a fin de aumentar la resistencia a la compresión del hormigón [Tesis de pregrado],» Universidad libre seccional Perreira, Perreira, Colombia, 2017.
- [29] A. I. Mora Vargas, «Guía para elaborar una propuesta de investigación,» *Revista Educación*, vol. 29, nº 2, pp. 77-97, 2005.
- [30] NTC, «Especificaciones de los agregados para concreto, NTC 174,» 2000. [En línea]. Available:  
<http://zonanet.zonafrancabogota.com/www/resources/norma%20NTC%20174%20de%202000.pdf>. [Último acceso: 03 01 2020].
- [31] G. A. Rivera L, Concreto Simple, 2008, Cauca, Colombia: Gustavo Gili S.A.
- [32] J. Diaz, S. Izquierdo, R. Mejía de Gutiérrez y M. Gordillo, «Mezcla ternaria de cemento portland, escoria de alto horno y piedra caliza: resistencia mecánica y durabilidad,» *Revista de construcción*, vol. 12, nº 3, pp. 53-60, 2013.
- [33] NTC 673, «Ensayo de resistencia a la compresión de especimenes cilíndricos de concreto, NTC 673,» [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/1120353985/ntc-673-compresion-concretos>. [Último acceso: 04 01 2020].
- [34] D. Camps , «El artículo científico: Desde los inicios de la escritura al IMRYD,» *Archivos de medicina*, vol. 3, nº 5, pp. 1-9, 2007.

- [35] C. A. Diaz, J. F. Casas, J. F. Aguirre, A. León y C. Williams, «Concreto reciclado (Proyecto Final),» Cali, Colombia, 2012.
- [36] C. M. Bedoya Montoya , «El concreto reciclado con escombros como generador de hábitats urbanos sostenibles: la ciudad como ecosistema semi-cerrado, una utopía cultural,» Medellín, Colombia, 2003.
- [37] K. Mehta y P. Monteiro, Concrete microstructure, properties, and materials, United States of America: Third Edition, 2017.
- [38] O. Giraldo Bolívar , «Guía practica para el diseño de mezcla de hormigon, Tesis profesor asistente, Universidad nacional de Colombia,» Medellin, Colombia, 1987.