

**DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO CON INCORPORACIÓN DE AGREGADO
RECICLADO DE BAJA DENSIDAD (LAMINADO PEBD-AL) PROVENIENTE DE
EMPAQUES, PARA APLICACIONES EN ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES.**

Presentado por:

Daniel Hernán Tipan Guerrero

Trabajo de grado presentado para optar por el título de:

INGENIERO CIVIL



Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Santiago de Cali, Colombia
septiembre 2025

**DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO CON INCORPORACIÓN DE AGREGADO
RECICLADO DE BAJA DENSIDAD (LAMINADO PEBD-AL) PROVENIENTE DE
EMPAQUES, PARA APLICACIONES EN ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES.**

Presentado por:

Daniel Hernán Tipan Guerrero

Trabajo de grado presentado para optar por el título de:

INGENIERO CIVIL

Directores:

Ing. Mónica Villaquiran PhD., Escuela Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle.

Ing. William Valencia PhD., Escuela Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle.



Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Santiago de Cali, Colombia
Septiembre 2025

DEDICATORIA

A mi madre Gloria Guerrero y a mi padre Fausto Tipan
por su amor incondicional, por su paciencia,
y su ayuda constante.
Los amo.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, mi padre, y a mis hermanos,
por su respaldo continuo, y hacerme
sentir acompañado en cada paso.

A las personas fogoneras de un mejor país,
porque me enseñaron el valor del trabajo colectivo,
y a soñar con propósito y esperanza.

A la comunidad de la Universidad del Valle,
por expandir mis fronteras del conocimiento,
y ofrecerme un espacio de pluralidad
y pensamiento crítico que forjaron
profundamente mi personalidad.

A quienes aportaron en la etapa final de mi pregrado,
a mis directores de este trabajo de grado, por su orientación y paciencia,
a los laboratoristas y monitores del Grupo de Investigación de Materiales Compuestos,
por su colaboración técnica, disposición y acompañamiento en el desarrollo experimental.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCION	2
2	MARCO TEÓRICO.....	4
	2.1 Definiciones.....	4
	2.2 Antecedentes	12
3	OBJETIVOS.....	15
4	METODOLOGÍA.....	16
	4.1 Caracterización de agregados naturales y reciclado	17
	4.2 Diseño de morteros.....	19
	4.2.1 Diseño de mortero	19
	4.3 Caracterización de morteros	20
	4.2.2 Ensayo de fluidez	20
	4.2.3 Ensayo de resistencia a la compresión.....	20
	4.2.4 Ensayo de resistencia a la flexión	21
	4.2.5 Ensayo de densidad, absorción y vacíos.....	22
	4.4 Diseño, elaboración y caracterización de concretos.....	22
	4.3.1 Fabricación y curado de especímenes de concreto	24
	4.3.2 Caracterización de concretos.....	25
	4.5 Diseño y elaboración de elemento no estructural.....	31
5	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	33
	5.1 Caracterización de agregados naturales y agregado reciclado	33
	5.1.1 Agregados Finos.....	33
	5.1.2 Agregados Gruesos.....	34
	5.1.3 Curva granulométrica Fuller-Thompson.....	36
	5.1.4 Microscopia con estereoscopio	37
	5.2 Propiedades físicas y mecánicas de morteros.....	37
	5.2.1 Ensayo de mesa de flujo	37
	5.2.2 Resistencia a la compresión de morteros	38
	5.2.3 Ensayo de Resistencia a Flexión	40
	5.2.4 Ensayo de densidad, absorción y porosidad	41
	5.3 Resultados de propiedades mecánicas y físicas de concretos	42
	5.3.1 Ensayo de asentamiento	42
	5.3.2 Ensayo de resistencia a la compresión.....	43
	5.3.3 Ensayo de resistencia a la flexión	45
	5.3.4 Ensayo de resistencia a la tracción indirecta.....	47
	5.3.5 Ensayo de absorción, densidad y porosidad.	48
	5.3.6 Prueba acústica	49
	5.3.7 Ensayo de propiedades térmicas	51
	5.3.8 Ensayo de llama directa	51
	5.4 Resultados de propiedades mecánicas y físicas del elemento no estructural.	55
	5.4.1 Ensayo de asentamiento	56
	5.4.2 Especificaciones del bloque	57
6	CONCLUSIONES	59
7	BIBLIOGRAFÍA	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de cementos hidráulicos. Fuente: ASTM C 1157	4
Tabla 2 Conductividad térmica de polímeros. Fuente: (Mark Editor, 2007).....	7
Tabla 3. Residuos Plásticos Aprovechables y Aplicaciones. <i>Fuente:</i> (ICONTEC, 1991).	9
Tabla 4. Normas ASTM para agregados Fuente: propia.	17
Tabla 5. Relación Agua/cemento para cada porcentaje de AR. Fuente: propia.....	19
Tabla 6. Normas ASTM para morteros. Fuente: propia.	19
Tabla 7 Normas ASTM para concretos. Fuente: propia.....	22
Tabla 8. Propiedades físicas del agregado fino. Fuente: propia.....	34
Tabla 9 Propiedad físicas del agregado grueso. Fuente: propia	35
Tabla 10. Resultados ensayo de mesa de flujo Fuente: propia.	38
Tabla 11 Evidencias ensayo compresión morteros. Fuente: propia.	39
Tabla 12 Resultados ensayo de propiedades físicas para morteros Fuente: propia.	42
Tabla 13 Cantidad de materiales para 1 m ³ de concreto. Fuente: propia.	42
Tabla 14. Resultados ensayo de propiedades físicas para concretos. Fuente: propia.....	48
Tabla 15. Propiedades térmicas del concreto. Fuente: propia.....	51
Tabla 16 Imágenes termográficas del concreto. Fuente: propia.....	53
Tabla 17 Registro fotográfico del ensayo de exposición a llama directa. Fuente: propia.	55
Tabla 18 Masa de materiales para 1 m ³ de bloque de mampostería. Fuente: propia.....	56
Tabla 19 Características del bloque de mampostería. Fuente: propia.	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Vista de un edificio con componentes estructurales y no estructurales. Fuente: (Agencia Federal para el Manejo de Emergencias, 2012)	7
Figura 2 Esquema de transmisión de sonido. Fuente: (Osswald & Menges, 2012).	8
Figura 3 Audiograma de sonidos familiares. Fuente:(Advanced Bionics AG, 2016)	9
Figura 4. Producción de residuos plásticos.....	10
Figura 5 Composición de envases multicapa Fuente: (Hidalgo-Salazar et al., 2013)	11
Figura 6 Bibliometría en VOSviewer. Fuente: propia.....	12
Figura 7 . Esquema experimental seguido durante la investigación. Fuente: propia.....	17
Figura 8. Estereoscopio usado para analizar PEBD-Al. Fuente: propia.....	18
Figura 9. Probeta para ensayo de densidad del PEBD-AL. Fuente: propia.....	18
Figura 10. Fabricación de cubos de morteros. Fuente: propia.	20
Figura 11. Ensayo compresión para morteros Fuente: propia.	21
Figura 12 Ensayo de resistencia a flexión para morteros Fuente: propia.	21
Figura 13 Montaje para ensayo de densidad, porosidad y absorción. Fuente: propia.	22
Figura 14 Materiales para mezcla de concreto Fuente: propia.	23
Figura 15 . Trompo mezclador. Fuente: propia.	24
Figura 16. <i>Equipo para ensayo de asentamiento</i> Fuente: <i>propia</i>	25
Figura 17. Prensa hidráulica para ensayo de compresión en concretos. Fuente: propia.....	26
Figura 18. Máquina Universal para ensayo a Tracción Indirecta Fuente: propia.....	27
Figura 19 Cámara anecoica de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Fuente: propia.....	28
Figura 20 Cámara aislante acústica. Fuente: (Acevedo Cristian, 2022)	28
Figura 21 Evidencia ensayo de propiedades térmicas. A. Referencia B. AR. Fuente: propia... ..	29
Figura 22. Montaje de ensayo de llama directa. Fuente: propia.....	30
Figura 23 Bloquera para elaboración de bloques de mampostería Fuente: propia.	31
Figura 24 Bloques de mampostería A. Referencia B. PEBD-Al Fuente: propia.....	32
Figura 25 Curva granulométrica para la arena y agregado reciclado. Fuente: propia.	33
Figura 26 Curva granulométrica para agregado grueso (grava). Fuente: propia.	35
Figura 27 Curva granulométrica de Fuller idealizada. Fuente: propia.....	36
Figura 28 Curva granulométrica combinada para concreto. Fuente: propia.	36
Figura 29 Evidencias del ensayo realizado en el estereoscopio. Fuente: propia.	37
Figura 30. Ensayo de Fluidez para morteros. Fuente: propia.	38
Figura 31 Resultados de ensayo a compresión para morteros. Fuente: propia.	39
Figura 32 Resultados para resistencia a flexión para morteros. Fuente: propia.....	41
Figura 33. Asentamiento para concretos. A) Referencia, y B) Agregado Reciclado. Fuente: propia.	43
Figura 34 Resultados de resistencia a compresión para concretos. Fuente: propia.	44
Figura 35 Evidencia ensayo a compresión A) Referencia, y B) Agregado Reciclado	45
Figura 36 Resultado de resistencia a flexión para concretos. Fuente: propia.	46
Figura 37 Evidencias ensayo a flexión A. Referencia B, AR. Fuente: propia.	46
Figura 38 Resultados de resistencia a tracción indirecta para concretos. Fuente: propia.	47
Figura 39 Evidencia ensayo tracción indirecta A. Referencia B. AR Fuente: propia	48
Figura 40 Presión sonora para concreto. Fuente: propia.	49

Figura 41 Pérdida transmisión sonora para concretos. Fuente: propia.....	50
Figura 42 Temperatura de concreto de Referencia y con AR. Fuente: propia.....	52
Figura 43 Comparación de flujo térmico para concretos. Fuente: propia.....	53
Figura 44. Ensayo de asentamiento para bloques de mampostería Fuente: propia.	56

RESUMEN

En este estudio se investigó el comportamiento mecánico, físico y termoacústico de mezcla de concreto con incorporación en volumen de agregados finos agregados reciclados (AR) de baja densidad (laminado PEBD-Al) procedentes de residuos de empaque tipo sachet. La sustitución se hizo inicialmente en el diseño de morteros y a partir de los resultados de propiedades mecánicas y físicas se definió remplazar el 5% para la elaboración de concretos. Se realizó un elemento no estructural y se evaluaron sus propiedades físicas y mecánicas, presentando un adecuado desempeño mecánico (13.7 MPa) y físico (absorción máxima de 12.3%) que satisface la normativa para el sector de la construcción.

Palabras claves: laminado PEBD-Al, concreto no estructural, residuos de empaques, economía circular, sector constructivo.

ABSTRACT

This study evaluated the mechanical, physical, thermoacoustic behavior of concrete mixtures in which a portion of the fine aggregate was replaced, by volume, with a lightweight material made from laminate LDPE waste sourced from sachet packaging. The replacement was first tested in mortar mixes, and based on results such as density and strength, a 5% replacement ratio was selected for concrete production. Using an optimized mix design, a non-structural element was fabricated, which showed suitable mechanical (13.7 MPa) and physical (maximum absorption of 12.3%) performance, making it potentially useful for the construction sector, as it aligns with the principles of the circular economy.

Keywords: laminated LDPE, non-structural concrete, packaging waste, circular economy, construction sector.

1 INTRODUCCION

De acuerdo con el Instituto Americano del Concreto (ACI), el concreto es un compuesto a base de áridos, cemento portland y agua. Además, puede contener adiciones puzolánicas y aditivos químicos o ambos; que sirven para mejorar las propiedades del mismo (American Concrete Institute, 2013). El concreto es la base fundamental para la elaboración de elementos estructurales y de algunos no estructurales. Los elementos estructurales son aquellos que soportan diferentes tipos de cargas como las gravitacionales, sísmicas, o de viento, como son las columnas, vigas, cerchas, entre otros. Mientras los elementos no estructurales no soportan los tipos de cargas mencionadas y responden solamente por su propio peso, entre estos están, los muros divisorios, muros de fachada, elementos arquitectónicos, entre otros (Agencia Federal para el Manejo de Emergencias, 2012).

En muchas edificaciones antiguas o que no cumplen la normativa sismo-resistente, cuando ocurre un evento sísmico los muros no estructurales provocan grandes pérdidas humanas, materiales y económicas debido a que estos elementos se caracterizan por estar contruidos con materiales de albañilería pesados y no reforzados como son ladrillos y/o bloques de hormigón tradicional. Por ejemplo, durante el terremoto de Whittier Narrows ocurrido en 1987, en Los Ángeles, California una estudiante murió debido al aplastamiento por un panel prefabricado de 2268 kg, el cual cayó casi 8 metros desde el exterior de un parqueadero en la Universidad Estatal de California; la estudiante intentaba salir del parqueadero de la planta baja cuando fue golpeada por el panel que caía (Agencia Federal para el Manejo de Emergencias, 2012)

Por otro lado, en el contexto del calentamiento global, el sector de la construcción no es ajeno a entender las graves consecuencias que provocan el incremento progresivo de la temperatura en la Tierra, tales como el cambio climático, en buena medida debido a la actividad humana. Por ejemplo, la extracción intensiva de los recursos naturales como la arena y la grava representa un problema ambiental y social. Estos materiales son fundamentales en la industria de la construcción, obtenidos de los ríos, canterías y ecosistemas costeros que provoca alteraciones en cauces fluviales, erosión de suelo, entre otras. Según (Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente, 2022) los seres humanos extraen 50 mil millones de toneladas de arena y grava cada año, siendo la arena el recurso natural de mayor extracción después del agua.

Otro factor que contribuye al calentamiento global es el incremento de la producción y consumo de plásticos. Este material es muy usado en el mundo gracias a sus características que permite múltiples usos y por su bajo costo. Sin embargo, los procesos de extracción, refinamiento y eliminación propios de la producción y de la incineración del plástico pueden llegar a emitir 850 millones de toneladas métricas de gases de efecto invernadero (Greenpace Colombia & Universidad de los Andes, 2019)

De acuerdo al informe de (PlasticsEurope, 2020) la producción de plásticos pasó de producir en 359 millones de toneladas en 2018, a 368 millones de toneladas en 2019, lo

que indica que se seguirá generando más residuo de este material. Uno de los usos más demandados son los envases plásticos o “Packaging laminado” utilizado en alimentos, bebidas y productos médicos. Estos plásticos, aunque son, ligeros, duraderos y facilita su transporte generan 141 millones de toneladas de desecho de acuerdo con (Geyer et al., 2017).

En este escenario, el sector de la construcción que es una de las ramas más importantes de la economía para el crecimiento del Producto Interno Bruto en Colombia (DANE, 2022) ha empezado a usar nuevas tecnologías e introducir materias primas alternativas con el objetivo de tener un enfoque de economía circular que mitigue los daños ambientales. Además, desde una perspectiva económica, la construcción sostenible es una alternativa rentable y viable en Colombia. De acuerdo con la guía de (Bancolombia & Establecimiento, 2020), este tipo de edificaciones dentro del sector financiero puede ser apoyado con tasas de interés preferenciales si cumplen con certificados como EDGE o LEED.

Lo anterior se enmarca dentro de la política del gobierno de Colombia que elaboró un documento llamado “Estrategia climática de largo plazo de Colombia E2050 para cumplir con el Acuerdo de París” donde traza una hoja de ruta que busca ciudades con un desarrollo urbano sostenible implementando proyectos con nuevas tecnologías para las prácticas de construcción sostenible, promocionando productos y estructuras de construcción que utilicen menos materiales y la sustitución de materiales primarios (Duque & Ramírez, 2018).

En este trabajo plantea utilizar residuo plástico (laminado PEBD-Al) como remplazo parcial de agregado fino en mezclas de concreto, con el objetivo de poder alargar la vida útil de este tipo de plástico, y reducir las tasas de este material que terminan en los vertederos municipales. El planteamiento de alternativas de uso en materiales no convencionales (residuos industriales) para la fabricación de mezclas de concreto con propiedades físicas y mecánicas que garanticen la funcionalidad de elementos no estructurales, es una de las líneas de investigación del Grupo Materiales Compuestos de la Escuela de Ingeniería de Materiales en la cual fue llevada a cabo esta investigación.

2 MARCO TEÓRICO.

2.1 Definiciones

Concreto: Mezcla de cemento hidráulico, agregados finos y gruesos, y agua, con o sin aditivos, fibras, u otros materiales cementantes (American Concrete Institute, 2013). Los componentes mencionados anteriormente, cuando reaccionan entre ellos con el agua y los minerales del cemento, generan una matriz resistente que fija los agregados finos y/o gruesos en su sitio, proporcionando al concreto una de sus propiedades mecánicas más importantes como es la resistencia a la compresión (Askeland, 2022).

Según (Eřtoková et al., 2022) el concreto constituye una de las principales fuentes de emisiones de carbono a nivel global, aportando entre un 8 y un 10% del total. La causa principal radica en la fabricación de cemento, donde la calcinación de la caliza para generar Clinker libera grandes volúmenes de CO₂. Su aplicación masiva en obras de edificación e infraestructura incrementa de forma considerable este impacto. Entre las alternativas de mitigación se destacan el desarrollo de cementos de bajo impacto ambiental, la utilización de insumos reciclados y la optimización de las proporciones de mezcla.

Cemento hidráulico: es un material aglutinante compuesto de diferentes minerales que reaccionando químicamente con el agua fragua y se endurece. Por ejemplo, el cemento portland y el cemento de escoria son cementos hidráulicos (American Concrete Institute, 2013). El cemento típicamente abarca alrededor del 15 por ciento del volumen de los sólidos dentro del concreto y la composición del cemento influye en la tasa de curado y las propiedades finales del concreto (Askeland, 2022). La ASTM C 1157 presenta seis tipos de cementos hidráulicos como muestra la Tabla 1.

Tabla 1 Tipos de cementos hidráulicos. Fuente: ASTM C 1157

Cemento	Desempeño
Tipo GU	Uso general
Tipo HE	Alta resistencia inicial
Tipo MS	Moderada resistencia a los sulfatos
Tipo HS	Alta resistencia a los sulfatos
Tipo MH	Moderado calor de hidratación
Tipo LH	Bajo calor de hidratación

El cemento Portland ordinario se ha utilizado de manera continua durante más de dos siglos como el principal constituyente del concreto. No obstante, su proceso de producción es altamente demandante en términos ambientales, pues concentra más del 70 % de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la industria del concreto. En el caso de Estados Unidos, la fabricación de cemento aporta cerca del 1.5 % de las emisiones totales de CO₂ generadas por actividades humanas. A escala global, se reportó que para

el año 2022 las emisiones anuales derivadas de este material alcanzaron aproximadamente 1.61 mil millones de toneladas, de acuerdo con (Marandi & Shirzad, 2025) .

Arena: La arena es agregado fino, típicamente del orden de 0.001 cm de diámetro. Generalmente contienen algo de agua absorbida, lo que deberá tomarse en consideración al preparar la mezcla de concreto (American Concrete Institute, 2013). La arena ayuda a llenar los huecos entre los agregados que son más gruesos, lo que consigue un alto factor de compactación, reduciendo la porosidad abierta o (interconectada) del concreto terminado; así, se reducen los problemas relacionados con la desintegración del concreto causada por la repetida congelación y descongelación durante el servicio (Askeland, 2022).

La arena es el segundo recurso más consumido en el mundo después del agua, con una extracción anual estimada en 50.000 millones de toneladas, lo que equivale a aproximadamente 18 kg por persona cada día (Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente, 2022) . Este material tiene un valor ambiental estratégico, ya que sustenta la biodiversidad y brinda servicios ecosistémicos esenciales, como la estabilización de deltas y la protección de zonas costeras frente al aumento del nivel del mar. Al mismo tiempo, constituye la base de la industria de la construcción, siendo un insumo indispensable en la producción de concreto, vidrio y carreteras. No obstante, la creciente demanda global, impulsada por la urbanización y el desarrollo de infraestructura, está generando una presión insostenible sobre los ecosistemas fluviales y costeros. La ONU advierte que, de mantenerse las tendencias actuales, el impacto ambiental y social de esta extracción se intensificará, comprometiendo tanto la resiliencia de los ecosistemas como la seguridad de las comunidades. En este sentido, reconocer la arena como un recurso estratégico es un paso fundamental hacia su gobernanza responsable y sostenible.

Grava: es un agregado de alta densidad, como barita, magnetita, hematita, limonita, ilmenita, hierro o acero, utilizado en hormigón pesado (American Concrete Institute, 2013). Los agregados gruesos están compuestos de grava y roca. Su presencia reduce la cantidad de pasta de cemento requerida, mejora la resistencia mecánica y contribuye a la durabilidad de la estructura, asegurando un desempeño adecuado frente a cargas y condiciones ambientales. La deben estar limpios, ser resistentes y durables. Naturalmente, el tamaño del agregado debe corresponder al tamaño de la estructura que se piensa producir; las partículas de agregados no pueden ser mayores al 20 por ciento del espesor de la estructura (Askeland, 2022).

De acuerdo con el (Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente, 2022), su extracción a gran escala forma parte del grupo de recursos minerales más utilizados por la humanidad, siendo indispensable para carreteras, presas, hospitales y viviendas. La grava cumple el rol de esqueleto estructural dentro del concreto, lo que resalta su carácter estratégico en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Sin embargo, la explotación intensiva de gravas fluviales y de cantera ha ocasionado alteraciones hidrológicas, pérdida de hábitats acuáticos y tensiones sociales en comunidades dependientes de estos entornos. En consecuencia, el manejo sostenible de la grava se vuelve prioritario para garantizar infraestructuras resilientes frente al cambio climático, sin comprometer la integridad de los ecosistemas ni el bienestar comunitario.

Elementos estructurales: Son aquellos elementos que pertenecen al sistema estructural de la edificación y soportan cargas gravitacionales, de sismos, de viento entre otros, tal y como lo muestra la Figura 1 de acuerdo a (Agencia Federal para el Manejo de Emergencias, 2012). En zonas de alta sismicidad, su diseño adquiere mayor relevancia, ya que deben responder no solo a cargas gravitacionales, sino también a esfuerzos dinámicos generados por los movimientos sísmicos. En este contexto, el estudio de materiales como el concreto modificado con plásticos reciclados resulta pertinente, pues permite analizar si estas innovaciones pueden mantener un adecuado desempeño estructural sin comprometer la seguridad frente a eventos sísmicos.

Entre los elementos estructurales más comunes están:

- Elementos verticales: columnas, postes, pilares.
- Elementos horizontales: cerchas, vigas.
- Muros de carga que aportan apoyo vertical o resistencia lateral
- Sistemas de cimentación como losas, zapatas, pilotes.

Elementos no estructurales: Los elementos no estructurales indicados en la Figura 1 son aquellos elementos que no hacen parte del sistema estructural y se encargan exclusivamente de soportar su propio peso o cargas aplicadas directamente. Según (Agencia Federal para el Manejo de Emergencias, 2012). En estos elementos se han concentrado múltiples investigaciones como las de (Ababio Ohemeng et al., 2014a), (Edike et al., 2024), (Al-Tamimi et al., 2020), y (Al-Tarbi et al., 2022) orientadas a la sustitución parcial de agregados por residuos plásticos, vidrios reciclados o subproductos industriales, con el fin de reducir la huella ambiental de la construcción sin comprometer la funcionalidad del sistema. Estos estudios han mostrado que, aunque el desempeño mecánico puede ser menor que en mezclas convencionales, la aplicación en elementos no estructurales es viable y contribuye a la sostenibilidad del sector al disminuir el consumo de recursos naturales y el volumen de desechos destinados a rellenos sanitarios.

Los elementos no estructurales se pueden clasificar en:

- Elementos arquitectónicos: muros divisorios, muros de fachadas, acristalamientos, techos, entre otros.
- Elementos mecánicos, eléctricos y de fontanería: ventiladores, tuberías, conductos, transformadores, unidades de tratamiento de aire, entre otros.
- Elementos de mobiliario, instalaciones y equipos: estanterías, mercancías al por menor, ordenadores, equipos especiales de industria, entre muchos otros.

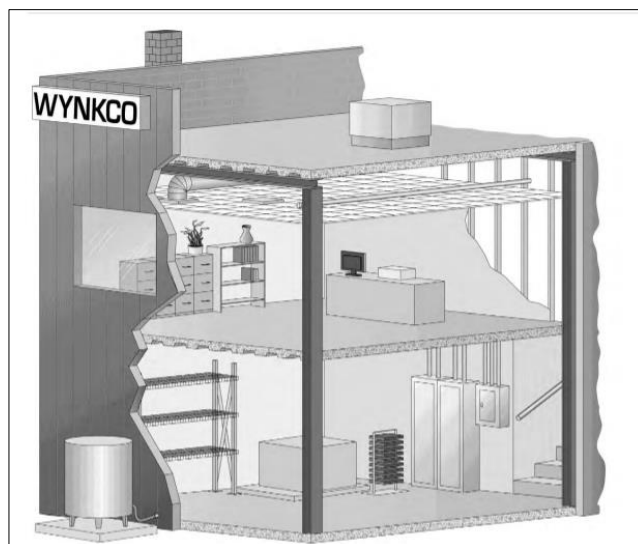


Figura 1 Vista de un edificio con componentes estructurales y no estructurales. Fuente: (Agencia Federal para el Manejo de Emergencias, 2012)

Materiales aislantes térmicos: Los materiales que son aislantes térmicos son aquellos que tienen una alta resistencia a la transferencia de calor, contribuyendo a la eficiencia energética, disminuyendo el consumo energético sin disminuir el confort (Cano & Avia, 2010). Los aislantes térmicos se evalúan mediante tres propiedades termo-físicas esenciales: la conductividad térmica (λ), que cuantifica la capacidad de un material para conducir calor a través de su volumen; la difusividad térmica (α), que indica la rapidez con la que un cambio de temperatura se propaga internamente, y el calor específico, que representa la energía necesaria para elevar un grado Kelvin la temperatura de una unidad de masa, propiedad que influye en la capacidad del material para almacenar calor antes de transferirlo de acuerdo con (Teknologi et al., 2016). El uso de residuo plástico como PET, PEBD o PEAD en investigaciones como (Záleská et al., 2018) y (Ruiz-Herrero et al., 2016) mostró que el efecto del polímero redujo el valor de la conductividad térmica debido a mayor porosidad en la zona de transición interfacial de la matriz cementicia. La Tabla 2 muestra la conductividad térmica de algunos polímeros.

Tabla 2 Conductividad térmica de polímeros. Fuente: (Mark Editor, 2007)

Polímero	Conductividad térmica (W/m*k)
Densidad Baja (PEBD)	0.33
Densidad media (PEMD)	0.42
Densidad alta (PEAD)	0.52

Materiales aislantes acústicos: Son aquellos materiales que reducen la transferencia de ruidos, disminuyendo su intensidad. Los sonidos emitidos dependiendo de la zona están reglamentados y pueden ser de baja, o alta intensidad que a largo plazo puede afectar la salud y disminuir el valor de la edificación por falta de confort. (Osswald & Menges, 2012).

Para lograr un aislamiento efectivo del ruido, es fundamental que los materiales utilicen dos principios: la reflexión y la absorción del sonido. Como se muestra la Figura 2, cuando las ondas de sonido chocan contra una pared aislante, una parte de la energía rebota (se refleja) y otra parte logra penetrar en el material. La clave está en que el material no solo debe reflejar el sonido, sino también absorberlo internamente. Una vez dentro, las ondas sonoras se debilitan y disipan gradualmente, convirtiendo la energía acústica en una pequeña cantidad de calor. Por esta razón, los materiales blandos y flexibles, como los elastómeros y ciertos plásticos, son mucho más efectivos para absorber el ruido que los materiales duros y rígidos como los metales (Osswald & Menges, 2012).

De acuerdo con (Castillo & Costa, 2012) al incrementar la porosidad de un material aumenta la transmisión sonora dado que la onda incidente penetra con mayor intensidad dentro del material. Debido a la mayor intensidad de onda, la fricción del aire con las paredes del material aumenta e incrementa la tasa de transformación de energía sonora a calórica. Existen múltiples sonidos externos e internos en las edificaciones que se busca sean aislados llamados sonidos familiares y se presentan en la Figura 3.

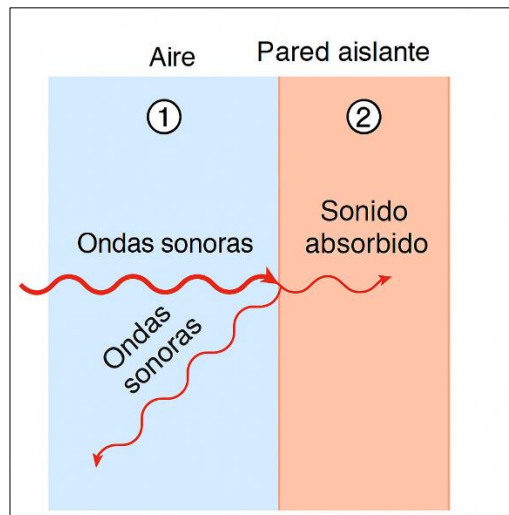


Figura 2 Esquema de transmisión de sonido. Fuente: (Osswald & Menges, 2012).

Las propiedades ventajosas del plástico, como su baja densidad y durabilidad, han impulsado este uso masivo, especialmente en aplicaciones de un solo uso dentro del sector de empaques. Esto deriva en la generación de enormes volúmenes de residuos plásticos que, debido a su naturaleza no biodegradable, persisten en el medio ambiente durante décadas (S & P, 2022) generando una cantidad de residuos de 141 millones de toneladas anuales en el sector de envases y empaques, muy por encima de otros sectores como el textil, los productos institucionales y de consumo, o la construcción, que oscilan entre 13 y 40 millones de toneladas de residuos. Adicionalmente (Abbas & Qureshi, 2025) encontró que entre 2011 y 2020 la generación global de residuos plásticos pasó de 279 a 367 millones de toneladas Figura 4. La gestión inadecuada de estos desechos, sumada a una huella de carbono de cerca de 6 kg de CO₂ por kilo de plástico, representa un serio desequilibrio ecológico, por ello se ha intentado reutilizar los residuos de resinas plásticas de diversas formas, entre ellas, como sustituto de recursos naturales en la elaboración de concreto.



Figura 4. Producción de residuos plásticos

PEBD: El Polietileno de Baja Densidad (PEBD o LDPE, por sus siglas en inglés) se caracteriza por una combinación de propiedades que lo hacen adecuado para aplicaciones que requieren flexibilidad y tenacidad. De acuerdo con (Mark Editor, 2007), este material presenta una densidad (ρ) entre 0.915 - 0.935 g/cm³, lo que confirma su naturaleza de polímero ligero. Mecánicamente, posee un módulo de elasticidad (E) en el rango de 0.1 - 0.3 GPa, lo que indica una baja rigidez y una notable flexibilidad. Su resistencia a la tracción (σ_p) es moderada, con valores entre 7 - 17 MPa, mientras que su deformación máxima (ϵ_p) es excepcionalmente alto (200 - 900 %), demostrando una gran capacidad de deformación plástica antes de la falla. El PEBD-AI, es un subproducto proveniente de reciclaje de envases multicapa que combina polietileno de baja densidad (PEBD) con capas de aluminio, siendo un material compuesto (Hidalgo-Salazar et al., 2013) como se indica en la Figura 5.

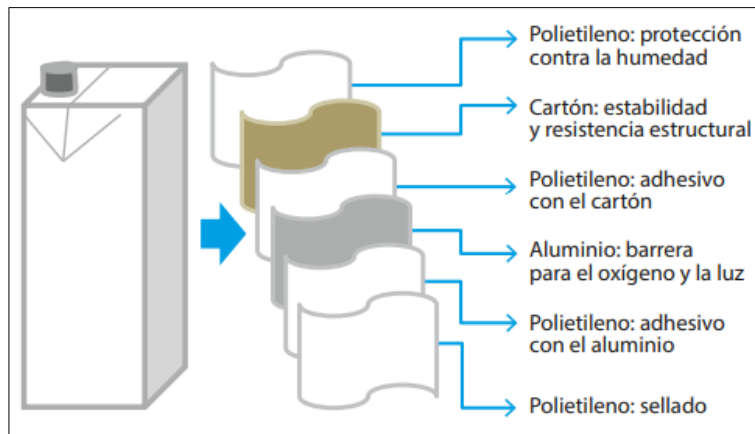


Figura 5 Composición de envases multicapa Fuente: (Hidalgo-Salazar et al., 2013)

El PEBD ha sido utilizado como sustituto de arena en múltiples investigaciones como las de (Galvão et al., 2011), (Ababio Ohemeng et al., 2014b), (Jibrin Sule et al., 2017), y (Al-Tarbi et al., 2022) en general estos y otros autores coinciden que la trabajabilidad aumenta proporcionalmente al porcentaje de plástico incorporado, atribuido a la naturaleza hidrofóbica de este material y al exceso de agua libre en la mezcla fresca. Además, las propiedades de resistencia como compresión, flexión, y tracción indirecta del concreto con agregados plásticos reciclados disminuyen debido a la pobre adhesión con la pasta de cemento y la naturaleza hidrofóbica del plástico. Sin embargo, técnicas de mejora lograron incrementar la adherencia y recuperar parcialmente dichas propiedades.

Economía Circular: La economía circular es un modelo industrial diseñado para ser regenerativo, basado en mantener los recursos en uso el mayor tiempo posible mediante la reutilización, reciclaje y recuperación de materiales reduciendo extracción de recursos naturales y residuos. (Oviedo Cogollo & Vega Suárez, 2022).

La economía circular aplicada a los plásticos constituye un modelo sostenible que transforma los residuos en recursos, ya sea mediante su reinserción como materias primas secundarias o mediante valorización energética cuando el reciclaje no es viable, evitando así su disposición final en vertederos. Actualmente, el sector impulsa la sustitución de recursos fósiles por alternativas renovables y la optimización de toda la cadena de valor con el fin de incrementar las tasas de recuperación, maximizar la eficiencia de recursos y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Por ejemplo, el sector de edificación y construcción es el principal destino de los plásticos reciclados, representando un 46% del total reutilizado en nuevos productos. Le siguen en importancia los envases y embalajes con un 24% y el sector agrícola con el 13% (PlasticsEurope, 2020). Esta distribución evidencia el papel clave de la construcción en la economía circular de materiales.

2.2 Antecedentes

Se realizó un análisis bibliométrico en VOSviewer con el objetivo de identificar las tendencias de investigación relacionadas con la incorporación de plásticos reciclados en materiales de construcción. La información fue obtenida de la base de datos de Scopus con palabras claves como: “concrete” y “waste plastic”, encontrando 1218 artículos relacionados con estos temas. El mapa de co-ocurrencia de la Figura 6 mostró cuatro líneas de investigación principales. El clóster amarillo relaciona el plástico reciclado con los agregados del concreto, el clóster verde está enfocado en el reciclaje y valorización de los residuos plásticos, el clóster azul vinculó el plástico con aplicaciones en asfaltos y aglutinantes, mientras el clóster rojo relaciona el plástico reciclado con propiedades mecánicas como la resistencia a compresión y tracción indirecta. Como se observa, los nodos de mayor tamaño correspondieron a los términos más investigados, evidenciando que la literatura se ha centrado en la caracterización mecánica, en el reciclaje de plásticos y en aplicaciones de asfaltos. Este enfoque resulta pertinente frente a la investigación desarrollada en este trabajo de grado, en el que se realiza análisis adicionales sobre características térmicas, acústicas y mecánicas de elementos no estructurales.

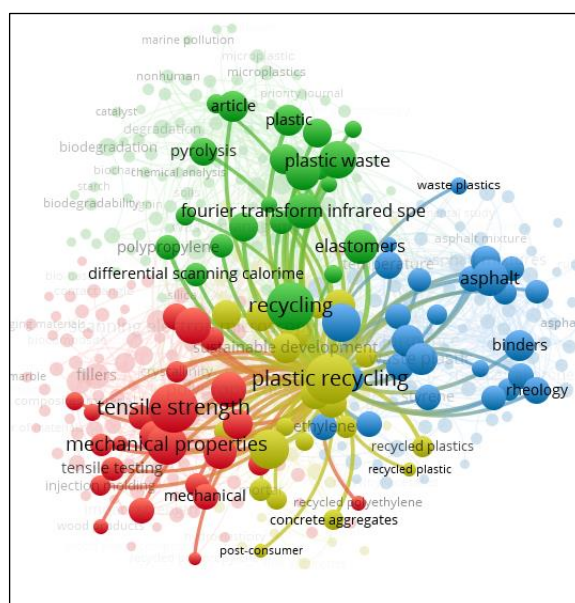


Figura 6 Bibliometría en VOSviewer. Fuente: propia.

La investigación de (Ohemeng & Ekoru, 2019) reemplazó volumétricamente a la arena en un 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% y 60% con molindas de desechos de PEBD. Utilizó relaciones de agua/cemento de 0.45, 0.5, 0.55 y 0.6 para las diferentes proporciones y evaluó la resistencia a la compresión en edades de 7, 14 y 28 días. Los resultados promedio indicaron que esta propiedad mecánica disminuyó significativamente en la medida que aumentó la proporción de PEBD en el mortero, siendo la mezcla de agua/cemento de 0.45 la que mejor comportamiento obtuvo. Cuando se reemplazó en 20% de PEBD, la resistencia a compresión se redujo en un 44-48%, manteniendo niveles aceptables para algunos usos, mientras que los que contenían entre 50% y 60% cumplió con requisitos para morteros tipo M, S, N y O.

Adicionalmente la investigación muestra que el porcentaje de reducción de densidad para los morteros tuvo una tendencia creciente en la medida que aumentó los porcentajes del residuo de PEBD dado que este polímero tiene una gravedad específica menor que la de la arena. Por ejemplo, cuando se usó una relación agua/cemento de 0.6, la densidad disminuyó desde valores de 2216 kg/m^3 con un reemplazo de 5% a una densidad de 1655 kg/m^3 con un reemplazo del 60%, es decir una disminución de más del 25%.

En la investigación de (Kunthawatwong et al., 2022) se usó residuos reciclados de tereftalato de polietileno (PET) como agregado fino en morteros elaborados a partir de cemento convencional y ceniza volante. El residuo se reemplazó en 10%, 20%, 30% y 40% en volumen del agregado fino. Los resultados de las propiedades mecánicas como la resistencia a compresión, flexión y tracción indirecta se deterioraron en la medida que aumento el PET tanto en la mezcla con geopolímero como con el cemento convencional. En el caso de la resistencia a compresión, para el mortero pasó de 49.5 MPa a 22.5 MPa en un rango de 0% hasta el 20%. Mientras que la resistencia a la flexión con disminuyó desde 6.7 MPa hasta 3.7 MPa, así como la resistencia a la tracción indirecta pasó de 3.4 MPa a 1.4 MPa.

También se evaluó el comportamiento térmico identificando la conductividad térmica disminuye con el aumento del agregado plástico, pasando de $2.003 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ con 0% de reemplazo a $1.118 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ con 20% de reemplazo. Lo anterior debido al aumento de porosidad y aire atrapado que impidió la conducción del calor, comportándose como mejor aislante térmico.

Un tercer estudio realizado por (Anand & Hamdan, 2022) determinó la resistencia a la compresión a los 28 días de mezclas de concreto con una sustitución de 5%, 10%, 15% y 20% de los áridos gruesos por residuos de plástico electrónico y, se observó un notable incremento en la resistencia a la compresión para 5% de sustitución del residuo plástico con valores de 51.27 KN/mm^2 . Sin embargo, el aumento de la sustitución mostró una disminución de la resistencia a la compresión con porcentajes de 10%, 15% y 20% con valores de 28.53 KN/mm^2 , 19.76 KN/mm^2 , y 10.11 KN/mm^2 respectivamente.

En la investigación desarrollada por (Mohammed et al., 2022) se utilizó siete polímeros termoplásticos reciclables: PCL, Policaprolactona, PEBD/EVA granular, PEBD /EVA en polvo, GPE, N-228 y TPE, como sustitutos en un 3% y 5% de áridos finos. En este caso se hizo énfasis en determinar si el sustituto generaría una mayor trabajabilidad y resistencia a la compresión y fue diseñado para un $f'c$ mayor a 50 MPa del concreto.

La incorporación de un 3% de polímero granular y en polvo mejoró la resistencia a la compresión del concreto, llegando cerca de 60 MPa para todos los termoplásticos usados, para una edad 28 días manteniendo valores semejantes para el concreto de control. El aumento de la resistencia a la compresión se debió a la adhesión del polímero que benefició a la distribución granulométrica de los áridos y a las características de adherencia de la matriz del concreto. Otro factor en los polímeros en polvo es que por ser partículas tan pequeñas rellenan los huecos y, en consecuencia, producen un concreto más resistente y denso. Además, para la sustitución en un 5% de los polímeros también se mantuvo valores cercanos y mayores a 60 MPa, teniendo el valor máximo el GPE con un valor de 65 MPa.

En el estudio realizado por (Saikia & De Brito, 2014) se utilizó agregado reciclado PET reemplazando el 5%, 10% y 15% en volumen del agregado natural fino. El residuo plástico fue de tres tamaños distintos y categorizados como PC, PF y PP. Se evaluó las propiedades mecánicas como resistencia a compresión donde la tendencia a los 28 días de curado con los diferentes porcentajes de reemplazo fue disminuyendo en la medida que se aumentó el porcentaje. El mayor valor de resistencia a compresión fue de 38 MPa con el reemplazo del 5% del PP. Adicionalmente la resistencia a la flexión obtuvo valores cercanos a los 5 MPa y fueron disminuyendo hasta 4 MPa para el PP, 3 MPa para el PF y 2.5 MPa para el PC. Mientras la resistencia a la tracción indirecta también tuvo una tendencia decreciente pasando desde los 3.5 MPa para el concreto de control y llegando a valores de 2.8 MPa, 2.2 MPa, y 1.2 MPa para un 15% de los sustitutos de PP, PF y PC respectivamente.

Finalmente la investigación de (Jibrin Sule et al., 2017) diseño concreto con una relación de agua/cemento de 0.65 y reemplazó el agregado fino con residuos plásticos en cinco porcentajes de 5%, 10%, 15%, 20% y 30%. Los resultados para la resistencia a la compresión a edades de 3, 7, 14, 21 y 28 días de curado mostraron una tendencia creciente de dicha propiedad mecánica y la que se dispuso de un 5% de reemplazo fue la de mejor desempeño obteniendo un valor cercano a 21 N/mm^2 semejante al del concreto de referencia a los 28 días de curado. Mientras que para la misma edad para un 10%, 15%, 20% y 30% de residuo los valores fueron de 19 N/mm^2 , 16 N/mm^2 , 15 N/mm^2 , y 9 N/mm^2 respectivamente.

En este mismo estudio se identificó que la densidad de los especímenes fue en diferentes días de curado inferiores al concreto de referencia y dicha propiedad disminuyó considerablemente en la medida que se aumentó el porcentaje de reemplazo. Por ejemplo, a una edad de 28 días la densidad para el 5% de reemplazo fue alrededor de 2450 Kg/m^3 , para el 10% de 2200 , para un 15% de 2275 Kg/m^3 , para un 20% de 2250 Kg/m^3 y para el 30% de 2075 Kg/m^3 .

3 OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar una mezcla de concreto elaborado con residuos de plástico (laminado PEBD-Al) que pueda ser empleada en la fabricación de elementos no estructurales.

Objetivos específicos

- Diseñar y preparar mezclas de mortero utilizando como sustitutos de agregado fino, residuos de plástico (laminado PEBD-Al), en volúmenes del 2.5%, 5%, 7.5% y 10%.
- Caracterizar las propiedades mecánicas, físicas y termo-acústicas de la mezcla óptima del mortero con incorporación de residuos de plástico (laminado PEBD-Al).
- Diseñar, producir y evaluar mezclas de concreto para la fabricación de un elemento no estructural y validar las propiedades físicas y mecánicas a partir de la mezcla optimizada con incorporación del residuo plástico. (laminado PEBD-Al).

4 METODOLOGÍA

La metodología de esta investigación se realizó en cuatro etapas.

La primera etapa consistió en la determinación de propiedades físicas de los agregados finos, gruesos y reciclados, como fueron la caracterización granulométrica, la densidad, la masa unitaria y contenido de materia inorgánica.

En la segunda etapa, se diseñaron, elaboraron y caracterizaron morteros con el fin de evaluar su comportamiento físico y mecánico. Para lo anterior, se realizó una sustitución volumétrica del agregado fino por agregado reciclado en porcentajes de 2.5%, 5%, 7.5% y 10%. Los ensayos llevados a cabo incluyeron determinación de densidad, absorción, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión.

En la tercera etapa se diseñó el concreto a través de la norma ACI 211 y con el método Fuller-Thompson se realizó una optimización de los agregados, seleccionando un porcentaje de sustitución volumétrica del 5% de agregados finos por agregado reciclado. Los ensayos llevados a cabo fueron ensayos termoacústicos, de llama directa, de resistencia a la compresión, flexión y tracción indirecta.

Finalmente, en la etapa cuatro se diseñó una mezcla seca para la realización de mampostería de concreto con el mismo porcentaje de remplazo de la anterior etapa, y se hicieron ensayos de densidad, asentamiento, y resistencia a la compresión. En la Figura 7 se presenta un diagrama de la metodología.

La investigación se desarrolló en las instalaciones de la Universidad del Valle de la Sede Meléndez en el edificio E44 de la Escuela de Ingeniería de Materiales; en los laboratorios de Materiales Cerámicos y Compuestos, y del Laboratorio de Caracterización de GMC y exclusivamente el ensayo de absorción acústica se realizó en el edificio E49 de la Escuela de Ingeniería Mecánica en el laboratorio de Vibraciones y Acústica.

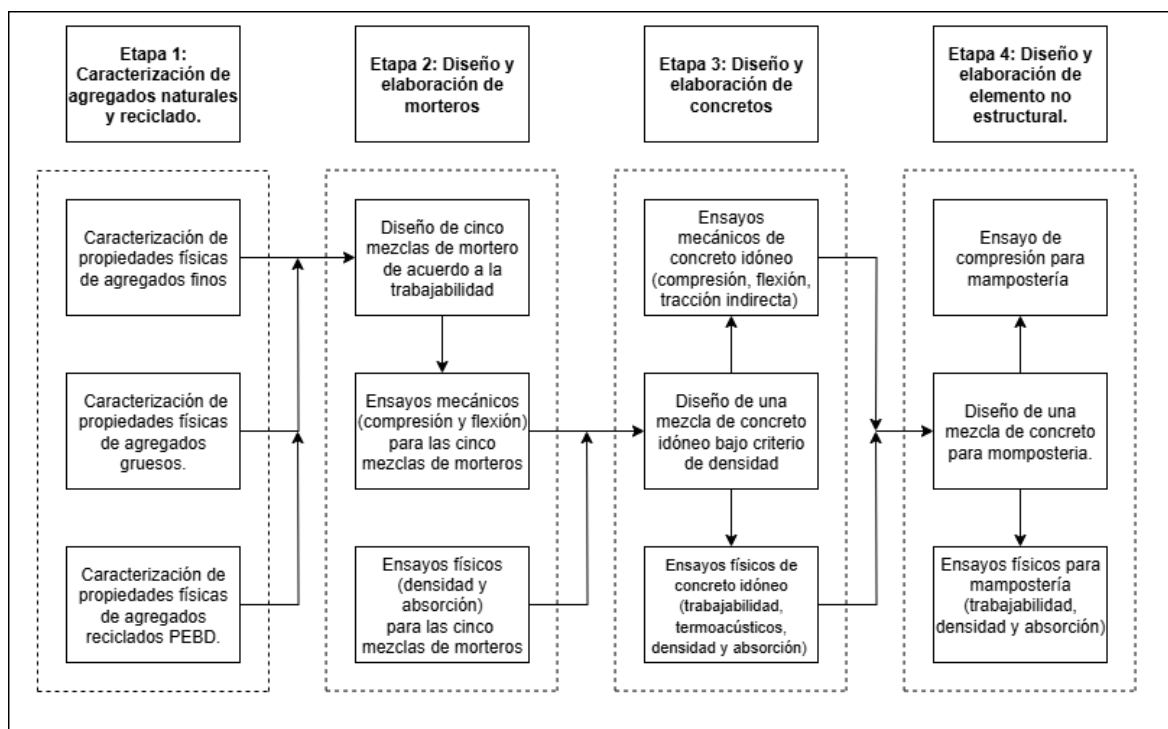


Figura 7 . Esquema experimental seguido durante la investigación. Fuente: propia.

4.1 Caracterización de agregados naturales y reciclado

Para la caracterización del agregado natural se realizaron ensayos de tamizado, densidad en masa, y de impurezas orgánicas, de acuerdo con las normas que aplican para los agregados finos debido a su característica de tamaño. Además, se realizó dos ensayos para determinar propiedades físicas como morfología y densidad.

La Tabla 4 muestra las normas técnicas utilizadas para la caracterización de los agregados finos y gruesos. Se realizaron los ensayos cumpliendo con cada una de las especificaciones que indican las normativas.

Tabla 4. Normas ASTM para agregados Fuente: propia.

Nombre del Ensayo	Norma
Método de ensayo estándar para el análisis por tamizado de agregados finos y gruesos.	ASTM D136 (ASTM, 2019) (ASTM, 2019)
Método de prueba estándar para la densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.	ASTM C128 (ASTM, 2022b) (ASTM, 2022b)
Método de prueba estándar para la densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso.	ASTM C127 (ASTM, 2024c) (ASTM, 2024c)
Método de ensayo estándar para la densidad en masa ("peso unitario") y vacíos en los agregados.	ASTM C29M (ASTM, 2023) (ASTM, 2023)
Método de prueba estándar para impurezas orgánicas en agregados finos para concreto.	ASTM C40 (ASTM, 2020a) (ASTM, 2020a)

Microscopia con estereoscopio para agregado reciclado

El agregado reciclado fue entregado triturado y limpio, y este ensayo se realizó con la ayuda de un estereoscopio de referencia Nikon SMZ1000 permitiendo inspeccionar superficialmente su morfología, su diversidad de colores, textura e irregularidades de veinte muestras. La Figura 8 presenta el equipo usado en este ensayo.



Figura 8. Estereoscopio usado para analizar PEBD-Al. Fuente: propia.

Ensayo de densidad para agregado reciclado

La norma ASTM D792 (ASTM, 2020c) indica distintos métodos de peso sumergido para determinar la densidad de plásticos a partir del principio de desplazamiento de Arquímedes. En este sentido, se utilizó el mismo principio, pero usando el desplazamiento volumétrico con la ayuda de una probeta de laboratorio. El líquido usado fue alcohol etílico que tiene una densidad mayor a la del plástico con el objetivo de que el agregado se sumerja como se aprecia en la Figura 9.

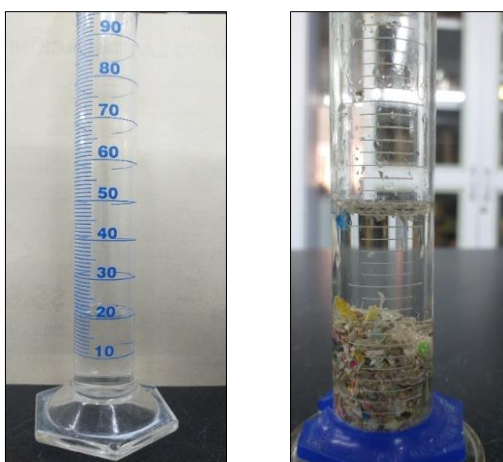


Figura 9. Probeta para ensayo de densidad del PEBD-AL. Fuente: propia.

4.2Diseño de morteros.

4.2.1 Diseño de mortero

Se diseñaron cinco mezclas de morteros, una mezcla de referencia y cuatro con sustitución volumétrica de arena por el agregado en porcentajes 2.5%, 5%, 7.5% y 10%. La base del diseño de las mezclas se realizó con una proporción de 1 parte de cemento Portland por 2.75 partes de arena, en proporción de masa, de acuerdo con la ASTM 1437. La Tabla 5 muestra la relación de agua/cemento de acuerdo con el porcentaje de reemplazo del agregado reciclado.

Tabla 5. Relación Agua/cemento para cada porcentaje de AR. Fuente: propia.

Porcentaje de Reemplazo %	Agua/OPC
0.0	0.70
2.5	0.64
5.0	0.61
7.5	0.60
10	0.59

Se elaboraron un total de 75 probetas para realizar los ensayos mecánicos y físicos, cumpliendo con las respectivas normativas, como indica la Tabla 6.

Tabla 6. Normas ASTM para morteros. Fuente: propia.

Nombre del Ensayo	Norma
Método de ensayo estándar para la fluidez del mortero de cemento hidráulico	ASTM C 1437 (ASTM, 2021d)
Método de ensayo estándar para la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico	ASTM C 109M (ASTM, 2024b)
Método de ensayo estándar para la densidad, absorción y vacíos en concreto endurecido	ASTM C 642 (ASTM, 2021a)
Método de ensayo estándar para la resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico	ASTM C348 (ASTM, 2021c)

4.3 Caracterización de morteros

4.2.2 Ensayo de fluidez

Se estableció como valores de aceptación lo indicado en la ASTM C109 que establece un rango de fluidez de 110 ± 5 mm en el ensayo de fluidez, dado que este rango asegura que el mortero tenga una consistencia adecuada para ser trabajable y fácil de colocar. A partir de ese criterio, se definió la relación agua/cemento para el diseño final de las cinco mezclas.

Una vez homogeneizada la mezcla, se colocó en un molde troncocónico ubicado en el centro de la mesa de flujo metálica. El molde se llenó en dos capas compactadas con una varilla metálica de acuerdo con la norma. Luego se retiró verticalmente el molde y a continuación se accionó el mecanismo de la mesa, permitiendo la elevación y caída veinticinco veces para finalmente medir los diámetros de la base extendida del mortero y así se calculó el valor promedio como indicador de la fluidez de la mezcla.

4.2.3 Ensayo de resistencia a la compresión

Los ensayos de compresión se realizaron siguiendo la norma ASTM C109 utilizando una mezcladora Hobart de 5 litros. Las mezclas se colocaron en moldes cúbicos de 50 mm X 50 mm x 50 mm, en dos capas, y se apisonaron con veinticinco golpes por capa para eliminar el aire atrapado como muestra la Figura 10.



Figura 10. Fabricación de cubos de morteros. Fuente: propia.

Después, los moldes se llevaron durante 24 h a una cámara con humedad controlada. Pasado este tiempo, se desmoldaron y se trasladaron a la cámara de curado durante 7 y 28 días, según el tiempo de ensayo. Cumplidos los días de curado, se realizó el ensayo que determina la resistencia a la compresión empleando la máquina universal de ensayos de marca Tinius Olsen, como muestra la Figura 11.



Figura 11. Ensayo compresión para morteros Fuente: propia.

4.2.4 Ensayo de resistencia a la flexión

Este ensayo se realizó con probetas de 40 mm × 40 mm × 160 mm, siguiendo la ASTM C348. El mortero fresco se dispuso en los moldes en tres capas y se compactó para tener una distribución homogénea de la mezcla y eliminar el aire atrapado. Luego de realizar el curado durante 7 y 28 días para cada una de las cinco mezclas, se realizó el ensayo de tres puntos para el cálculo de la resistencia a la flexión (Figura 12). Finalmente, se registró el valor máximo de rotura de los especímenes para cada una de las mezclas.



Figura 12 Ensayo de resistencia a flexión para morteros Fuente: propia.

4.2.5 Ensayo de densidad, absorción y vacíos.

Se realizó el ensayo conforme a la norma ASTM C642 a una edad de curado de 28 días. Primero, los especímenes se secaron en horno a 110 ± 5 °C, registrando su masa seca. Luego, se sumergieron en agua durante 48 horas y se midió su masa en condición saturada y seca superficialmente. Posteriormente, se hirvió durante cinco horas y se dejaron enfriar en el agua hasta temperatura ambiente, para tomar la medida de la masa saturada. Finalmente, se determinó la masa aparente de los especímenes sumergidos en agua. Con las cuatro medidas anteriores se calculó la absorción, la densidad aparente y el volumen de vacíos. La Figura 13 evidencian los montajes realizados para este ensayo.



Figura 13 Montaje para ensayo de densidad, porosidad y absorción. Fuente: propia.

4.4 Diseño, elaboración y caracterización de concretos

La Tabla 7 muestra las normas que se usaron para los diferentes ensayos y proceso del concreto. El diseño de la mezcla de concreto se realizó conforme al método ACI 211, donde previamente se hizo una optimización de agregados mediante el método Fuller-Thompson. Los requisitos establecidos para el diseño fueron, resistencia a la compresión de 20 MPa con un factor de seguridad de 8.5 MPa a una edad de 28 días, un asentamiento $100 \text{ mm} \pm 25 \text{ mm}$. Posteriormente, se seleccionó el tamaño máximo nominal de 19 mm de agregado grueso para asegurar una adecuada trabajabilidad. El contenido de agua se determinó con las recomendaciones de la normativa a partir del TMN y el asentamiento, eligiendo el valor de agua de 205 kg. La relación agua/cemento de 0.58 se determinó usando una correlación proporcional en función de la resistencia especificada que permitió calcular el contenido de cemento por metro cúbico. Como se mencionó anteriormente, se usó el método de Fuller-Thompson para obtener una curva teórica ideal y se evaluaron diferentes proporciones de arena y grava hasta identificar la combinación que mejor se ajustó a dicha curva, minimizando la desviación cuadrática.

Tabla 7 Normas ASTM para concretos. Fuente: propia.

Nombre del Ensayo	Norma
Guía para la selección de proporciones de mezcla de concreto	ACI 211 (American Concrete Institute, 1991)
Método de ensayo estándar para el asentamiento del concreto con cemento hidráulico	ASTM C 143 (ASTM, 2020b)
Práctica estándar para la fabricación y curado de especímenes de concreto en laboratorio	ASTM C 192 (ASTM, 2024a)
Método de ensayo para la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto	ASTM C39M (ASTM, 2024b)
Método de ensayo para la resistencia a la flexión del concreto	ASTM C 78 (ASTM, 2022a)
Método de ensayo para la resistencia a la tracción indirecta del concreto	ASTM C 496 (ASTM, 2017)(ASTM, 2017)
Método de ensayo estándar para la densidad, absorción y volumen de vacíos en concreto endurecido	ASTM C 642 (ASTM, 2021b)(ASTM, 2021b)

A partir de esta proporción óptima se determinó la densidad unitaria del agregado combinado y con dicho valor y el volumen absoluto de los agregados, se calculó el contenido total de los agregados por metro cúbico. Finalmente, se hicieron los ajustes de humedad y absorción, y se elaboró una mezcla patrón de prueba para verificar la trabajabilidad y resistencia. La Figura 14 muestra los materiales usados para la elaboración del concreto.

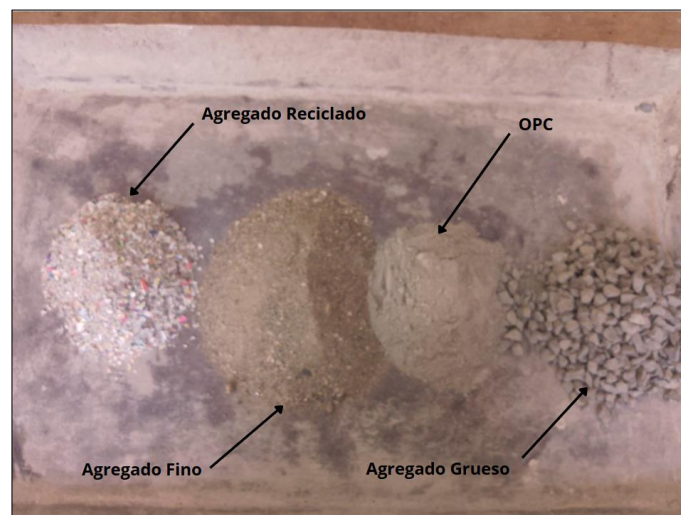


Figura 14 Materiales para mezcla de concreto Fuente: propia.

Se realizaron dos mezclas de concreto, una para el concreto de referencia, y otra para el concreto con agregado reciclado que sustituyó volumétricamente en 5% al agregado fino, este porcentaje se definió a partir del criterio de la densidad evaluada en los morteros. Para

la fabricación de las mezclas de concreto se usó una mezcladora convencional como muestra la Figura 15.



Figura 15 . Trompo mezclador. Fuente: propia.

4.3.1 Fabricación y curado de especímenes de concreto

Para la elaboración de la mezcla de referencia y la de agregado con residuo se moldeó cuarenta y cuatro cilindros para ensayos de resistencia a compresión, resistencia a la tracción indirecta, conductividad térmica, densidad y absorción, seis vigas prismáticas para ensayo de resistencia a flexión, y cuatro placas para ensayos de llama directa y absorción acústica.

Posteriormente, las probetas fueron desmoldadas a las 24 horas y curadas por inmersión en piscinas de agua con cal, manteniéndolas a una temperatura de 23 ± 2 °C. Los especímenes destinados al ensayo de resistencia a compresión fueron curados durante 7 y 28 días, mientras que las correspondientes a los demás ensayos fueron curados hasta los 28 días. El proceso anteriormente descrito se basó en la norma ASTM C192.

4.3.2 Caracterización de concretos

4.3.2.1 Ensayo de asentamiento

Para la evaluación del ensayo de trabajabilidad de las mezclas de concreto se aplicó el procedimiento descrito en la ASTM C143, basado en el cono de Abrams. Utilizando un molde troncocónico, este se colocó sobre una superficie rígida, húmeda y no absorbente, y se llenó en tres capas de igual altura. Una vez lleno, se enrasó el concreto y se retiró el molde en dirección vertical. Finalmente, se midió la diferencia entre la altura original del molde y la altura máxima del concreto después del asentamiento.

Con el objetivo de tener mezclas con una buena fluidez se definió tener un asentamiento $100 \text{ mm} \pm 25 \text{ mm}$ y así mantener una buena trabajabilidad. La Figura 16 indica los elementos usados para el ensayo de trabajabilidad.



Figura 16. *Equipo para ensayo de asentamiento Fuente: propia.*

4.3.2.2 Ensayo de resistencia a la compresión

Este ensayo se ejecutó conforme a la norma ASTM C39. Las probetas cilíndricas empleadas se realizaron en moldes estándar de 85 mm de diámetro por 150 mm de altura. Cada espécimen fue centrado en la máquina universal como muestra la Figura 17 y se aplicó la carga axial de forma continua a una velocidad controlada, hasta la falla del mismo. Este procedimiento se realizó para las probetas a una edad de curado de 7 y 28 días.

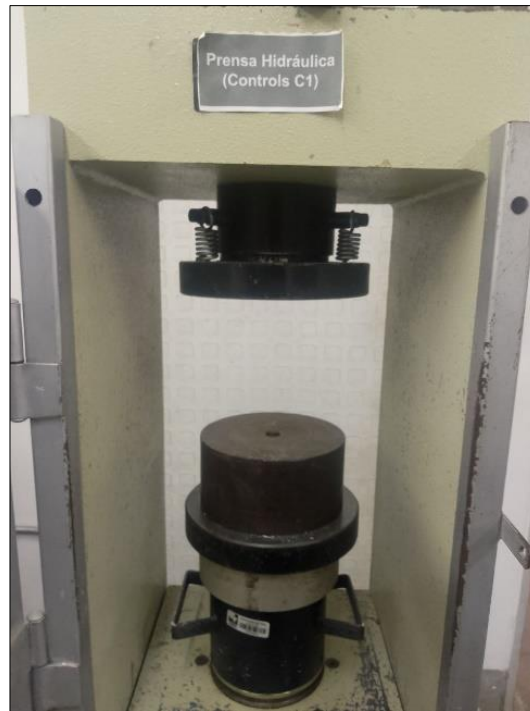


Figura 17. Prensa hidráulica para ensayo de compresión en concretos. Fuente: propia.

4.3.2.3 Ensayo de resistencia a la flexión

El ensayo de resistencia a la flexión realizado para ambas mezclas se hizo con moldes de vigas prismáticas de 75 mm x 75 mm x 315 m. Las vigas fueron sometidas a una configuración de carga en el centro del claro, colocándolas sobre dos apoyos y aplicando una carga puntual en la parte superior, justo en la mitad de la luz. Esta configuración produjo un momento flector máximo en la zona central de la viga, permitiendo evaluar el módulo de ruptura del concreto. Este ensayo se realizó de acuerdo con la norma ASTM C78 y el montaje es el mismo de mostrado en La Figura 12 en la sección de morteros.

4.3.2.4 Ensayo de resistencia a la tracción indirecta

Para determinar la tracción indirecta del concreto, se emplearon especímenes cilíndricos de 85 mm de diámetro por 150 mm de altura, ensayadas mediante compresión diametral. El proceso descrito en la norma ASTM C496, consiste en aplicar una carga lo largo del eje horizontal del cilindro utilizando placas de carga adaptadas, generando esfuerzos de tracción en el plano diametral. La carga se aplicó de forma continua hasta la rotura de las probetas, permitiendo calcular la resistencia a la tracción a partir de la carga máxima registrada. La Figura 18 muestra el montaje del equipo utilizado y disposición de las probetas durante el ensayo.

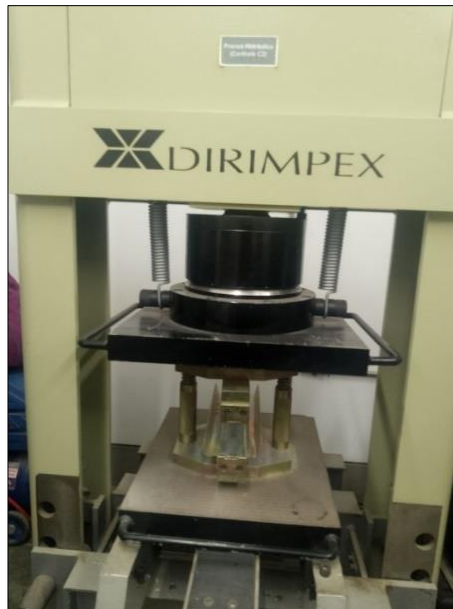


Figura 18. Máquina Universal para ensayo a Tracción Indirecta Fuente: propia.

4.3.2.5 Ensayo de densidad, absorción y porosidad

Este ensayo se realizó según la norma ASTM C642 utilizando probetas cilíndricas de concreto durante 28 días. Cada espécimen fue secado en horno a 100 ± 5 °C hasta alcanzar la masa constante durante 48 horas, luego de ser enfriadas a temperatura ambiente se tomó sus respectivas masas secas. Posteriormente, se sumergieron durante 24 horas en agua durante 24 horas, y se tomaron los valores de las masas saturadas superficialmente secas, después las probetas se hirvieron durante 5 horas para alcanzar la máxima saturación y se determinó los nuevos valores de las masas. Para finalmente calcular las masas aparentes de los especímenes bajo agua con la balanza hidrostática. El montaje experimental es el mismo de mostrado en La Figura 13 en la sección de morteros.

4.3.2.6 Ensayo de medición acústica

El ensayo tuvo como propósito determinar la transmisión acústica de una placa de concreto elaborada con la mezcla con PEBD, con el fin de evaluar el efecto del agregado reciclado sobre su capacidad de transferencia sonora. El montaje experimental se basó en el diseño de los autores (Acevedo Cristian, 2022) y (González B. et al., 2008) como indica la Figura 19, que consistió desarrollar el proceso en una cámara externa anecoica, en este caso se usó la cámara del laboratorio de Vibraciones y Acústica de la Escuela de Ingeniería Mecánica con dimensiones 2,44 m x 2,44 m de planta, por 2,39 m de alto como muestra la Figura 20 con el fin de aislar el ruido exterior, y además se usó la cámara interna aislada acústicamente diseñada por (Acevedo Cristian, 2022), compuesta en su interior por distintas capas de materiales aislantes y de dimensiones.

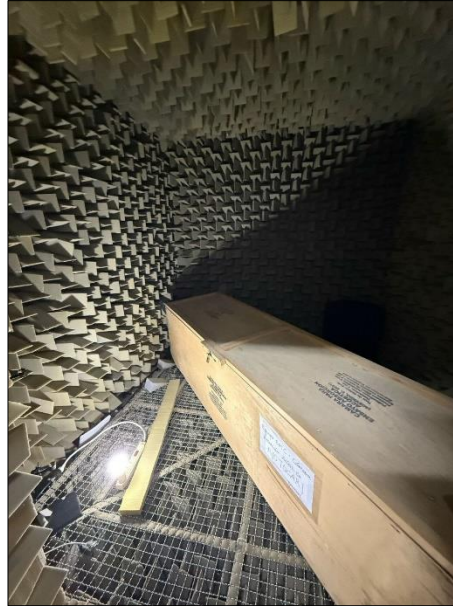


Figura 19 Cámara anecoica de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Fuente: propia.

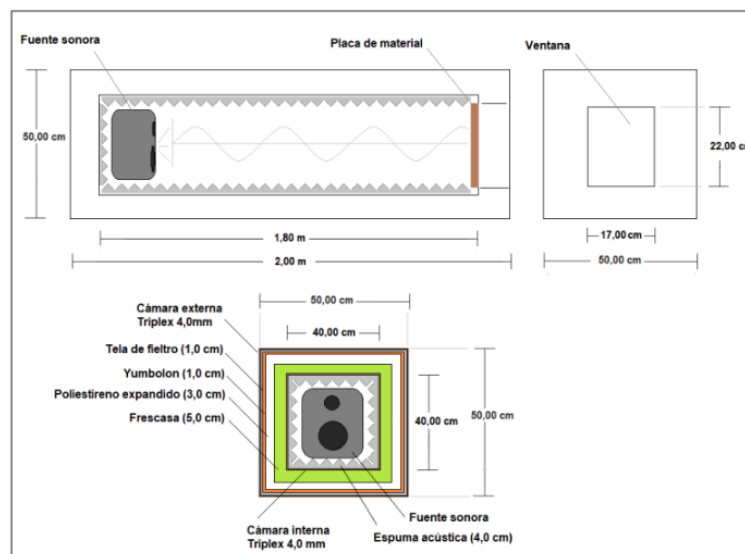


Figura 20 Cámara aislante acústica. Fuente: (Acevedo Cristian, 2022)

El ensayo de transmisión acústica se realizó siguiendo la metodología de los autores citados. En un extremo de la cámara se ubicó una fuente de sonido que emitió señales a frecuencias de 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz y 4000 Hz. En el extremo opuesto se instaló un sonómetro calibrado encargado de registrar la presión sonora transmitida, medida en decibeles (dB). En el montaje de este ensayo hubo diferencias dimensionales entre las placas del concreto y la abertura de la cámara acústica, de tal manera que para garantizar el soporte adecuado de cada muestra y evitar desplazamientos se utilizó segmentos de poliestireno expandido en el borde superior e inferior de la ventana.

El ensayo consistió en medir la presión sonora directa de la fuente y luego se repitió la medición al incorporar de forma individual el concreto de referencia y se calculó la transferencia acústica con la siguiente ecuación:

$$T = L_1 - L_2$$

Ecuación 1 Pérdida de transferencia acústica

Donde:

T= Transmisión acústica

L₁= fuente emisora

L₂= fuente receptora

4.3.2.7 Ensayo de conductividad térmica

Para la determinación de la conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico de las mezclas tanto de referencia como del agregado reciclado se utilizó el equipo Hot Disk TPS 500 S de la marca Thermtest, siguiendo lo definido en la norma ISO 22007-2. Esta técnica se fundamenta en el método de la fuente plana transitoria, donde el sensor de tipo disco caliente; Kapton 5465, con un radio 3,189 mm, se ubica entre dos muestras de igual material. Dicho sensor tiene doble función como generador de calor y dispositivo de medición, emitiendo un pulso térmico constante mediante efecto Joule que se dispersa hacia ambos lados de la muestra. El registro del incremento de temperatura en función del tiempo permitió calcular las propiedades térmicas. La Figura 21 evidencia el procedimiento del ensayo.

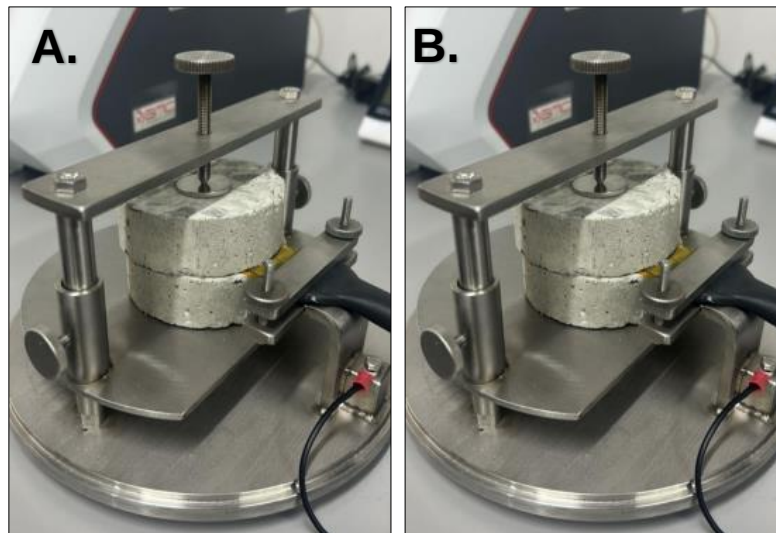


Figura 21 Evidencia ensayo de propiedades térmicas. A. Referencia B. AR. Fuente: propia.

4.3.2.8 Ensayo de llama directa

El ensayo se realizó utilizando un soplete con boquilla capaz de dirigir una llama concentrada sobre la superficie de las placas de concretos, una de referencia y otra con agregado reciclado curadas a 28 días. El combustible usado fue gas MAPP Pro, que generó una llama de salida aproximada de 3700 °F. La medición de la temperatura se hizo con un termómetro infrarrojo, registrando valores tanto en la cara expuesta a la llama como en la cara opuesta con el objetivo de analizar la transferencia térmica a través del espesor del material.

La metodología fue adaptada con base en la propuesta experimental de (Vallejo Camila & Villota Jorge, 2023) con el montaje sugerido como muestra la Figura 22. Para mantener una aplicación uniforme, el soplete fue fijado a un ángulo de 45°, mientras que los elementos se posicionaron a una distancia de 10 cm respecto a la boquilla y la exposición se mantuvo durante 15 minutos. Es importante tener en cuenta que el viento en el lugar del ensayo y la manipulación del estabilizador universal posiblemente hizo variar algunos valores registrados porque la dirección de la llama en algunos momentos no fue siempre la misma.



Figura 22. Montaje de ensayo de llama directa. Fuente: propia.

Adicionalmente, se realizó un análisis del flujo térmico usando la forma integrada de la ley de Fourier conociendo el espesor del material y la diferencia de temperatura entre ambas caras del elemento ensayado, como indica la Ecuación 2.

$$q = \frac{k * \Delta T}{L}$$

Ecuación 2 Flujo térmico

Donde:

q = flujo térmico (W/m²)

k = conductividad térmica del material (W/m*k)

ΔT = es la diferencia de temperatura entre las dos caras del material (K o °C)

L = espesor del material (m)

4.5 Diseño y elaboración de elemento no estructural.

El diseño de bloques de mampostería fue desarrollado bajo la misma metodología del diseño de concreto, con la diferencia de la trabajabilidad, porque se buscó obtener mezclas secas con el objetivo de lograr una mayor compactación y resistencia mecánica. Se realizaron 44 litros para ambas mezclas que fueron suficientes para la fabricación de seis bloques de mampostería, las dimensiones promedio fueron de 19.6 cm x 39.46 cm x 12.1 cm (alto, largo y ancho) de acuerdo con los moldes de fabricación de la bloquera vibrocompactadora de la Escuela de Ingeniería de Materiales.

Luego de fabricar los bloques de mampostería, estos se ubicaron en una zona de sombra y cubiertos durante 24 horas antes de ser trasladados a las piscinas de curación. La

Figura 23 muestra el equipo donde se elaboraron los bloques de mampostería y la figura 20 las unidades de mampostería elaboradas. Los bloques fueron evaluados para su clasificación con base en las normas ASTM 140 y ASTM 90-24a.



Figura 23 Bloquera para elaboración de bloques de mampostería Fuente: propia.

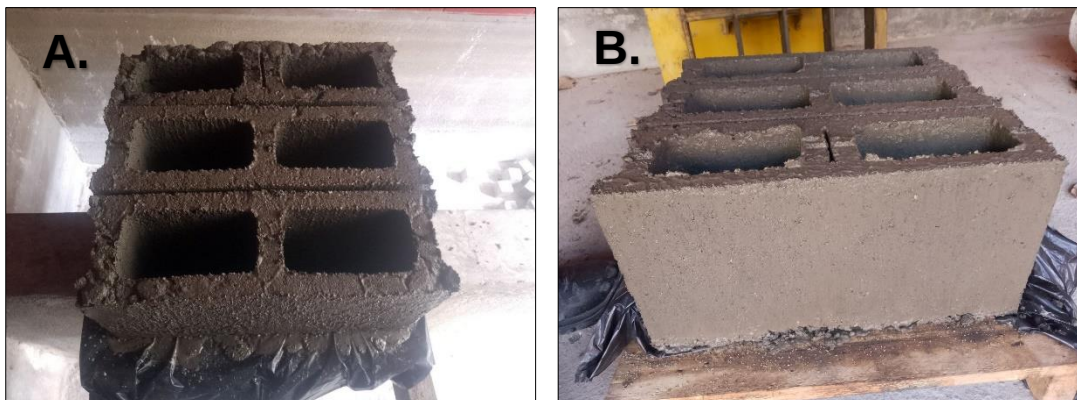


Figura 24 Bloques de mampostería A. Referencia B. PEBD-AI Fuente: propia.

5 ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1 Caracterización de agregados naturales y agregado reciclado

5.1.1 Agregados Finos

El ensayo de granulometría por tamizado para finos se desarrolló siguiendo la norma ASTM C136 utilizando tamices estándar con aberturas de 2.36 mm, 1.18 mm, 0.6 mm, 0.3 mm, 0.15 mm y 0.075 mm. Como se observa en la Figura 25 hubo una mayor concentración de partículas entre los tamices de 1.18 mm y 0.6 mm. Se registró un 78% de material que pasó por el tamiz de 1.18 mm y un 60.92% por el de 0.6 mm. En los tamices con menor abertura, los porcentajes que pasan fueron de 17.65% para 0.3 mm, 1.47% para 0.15 mm y 0.56% para 0.075 mm, todos dentro de los límites de la norma. Para la curva granulométrica del agregado con residuo se usó una serie de tamices con aberturas estándar, desde el tamiz de 4.75 mm donde pasó el 89.94% del material hasta tamices más finos de 0.15 mm y llegando al 0% del material pasante. En efecto, el comportamiento de la curva con AR evidenció que el agregado no es un fino convencional, ya que no contienen una fracción considerable en las partículas menores a 2.63 mm.

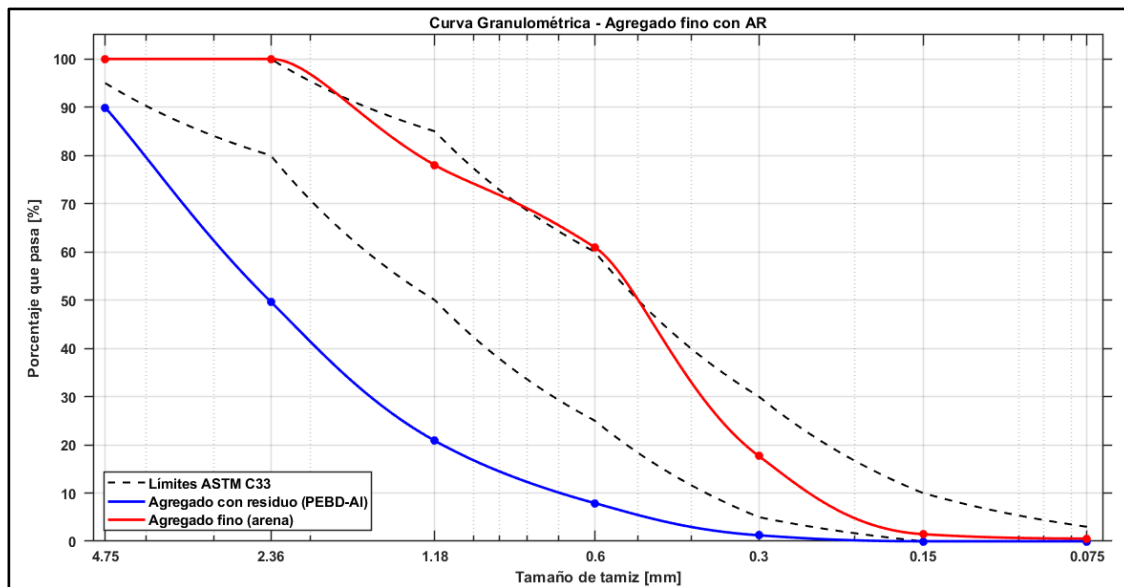


Figura 25 Curva granulométrica para la arena y agregado reciclado. Fuente: propia.

En la Tabla 8 se presenta algunas propiedades físicas del agregado fino y el AR, para la arena se obtuvo una densidad aparente que fue de 2.67 g/cm^3 y una absorción de 1.68% dentro de rangos aceptables para agregados naturales, la masa unitaria suelta y compacta fue de 1503.11 kg/m^3 y 1577.73 kg/m^3 respectivamente. El porcentaje de vacíos fue de $43,7\%$ que implica un buen grado de acomodamiento de partículas. Adicionalmente se realizó el ensayo de impurezas inorgánicas del agregado fino según la norma ASTM C40 obteniendo un valor en la escala de colores Gardner Estándar N°2. Este resultado indicó

una baja presencia de contaminantes inorgánicos, y fue aceptable para su uso en mezclas de mortero y concreto.

Para el agregado reciclado, se determinó una densidad aparente de 0.96 g/cm^3 , considerablemente inferior a la de los agregados naturales asociada a la naturaleza polimérica del material, y confirma su carácter liviano. En cuanto a la masa unitaria, los valores fueron de $256,50 \text{ kg/m}^3$ en estado suelto y $285,83 \text{ kg/m}^3$ en estado compactado, y el porcentaje de vacíos de 74,27% que indicó la alta porosidad del material porque las partículas al ser irregulares y livianas no se acomodan compactamente entre si manteniendo una baja capacidad de empaquetamiento.

Tabla 8. Propiedades físicas del agregado fino. Fuente: propia.

Ensayo	Agregado Fino	Agregado Reciclado (AR)
Módulo de Finura	3,4	5,3
Densidad aparente (g/cm³)	2,67	0,96
Absorción (%)	1,68	--
Masa unitaria Suelta (Kg/m³)	1503,11	256,50
Masa unitaria Compacta (Kg/m³)	1577,73	285,83
Vacíos %	43,7	74,27
	N.º 2	
Impureza Inorgánica del Agregado Fino		--

5.1.2 Agregados Gruesos

Este ensayo también se desarrolló siguiendo la norma ASTM C136, en este caso usando tamices con aberturas de 25 mm, 19 mm, 12.5 mm, 9.5 mm, 4.75 mm y 2.36 mm. Los resultados mostraron que el 100% del material pasó por los tamices de 25 mm y 19 mm, mientras que un 80.37% pasa por el de 12.5 mm, indicando una proporción significativa de partículas medianas. A su vez, los porcentajes que pasaron los tamices de 9.5 mm, 4.75 mm y 2.36 mm fueron de 41.94%, 0.98% y 0% respectivamente. De esta forma también se pudo calcular el tamaño máximo nominal, siendo de 19 mm, con un gradado continuo y sin presencia significativa de finos. La Figura 26 indica los resultados generales del ensayo.

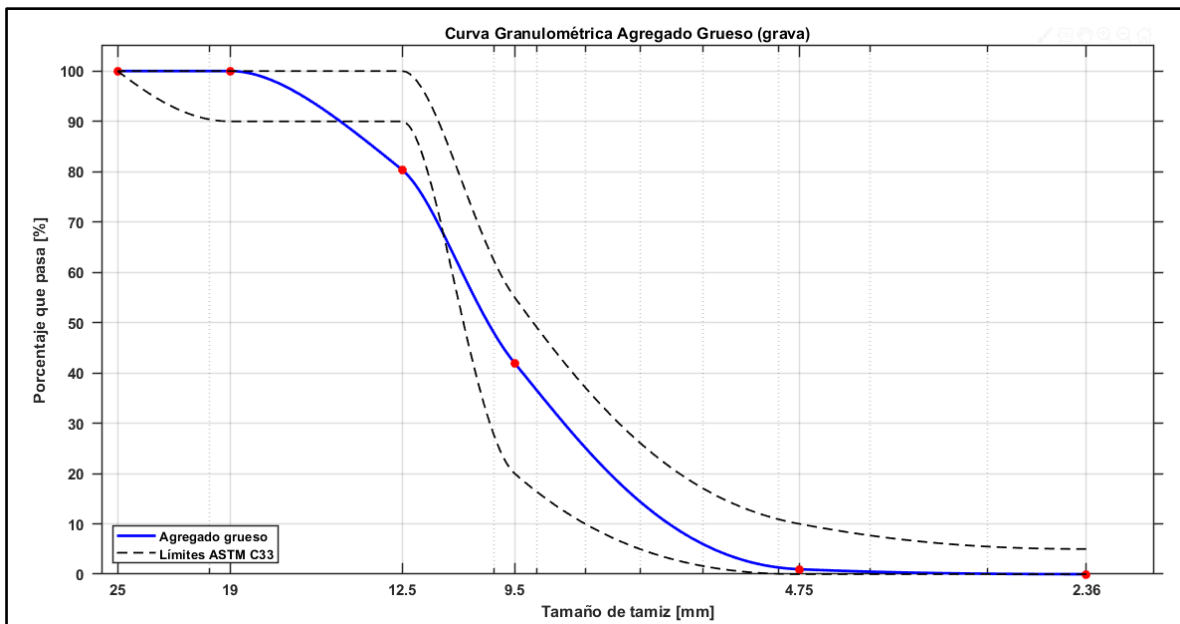


Figura 26 Curva granulométrica para agregado grueso (grava). Fuente: propia.

El agregado grueso utilizado en la investigación presentó, una densidad aparente de 2.82 g/cm³ y una absorción de 1.52%, valores que se encuentran dentro de los límites de gravas naturales. La masa unitaria suelta fue de 1474.36 kg/m³ y la masa compacta de 1555.72 kg/m³, que correspondió a un porcentaje de vacíos del 47,72%. La Tabla 9 muestra un resumen de las propiedades mencionadas.

Tabla 9 Propiedad físicas del agregado grueso. Fuente: propia

Propiedades físicas Agregado Grueso	
Tamaño máximo nominal (mm)	19
Densidad aparente (g/cm ³)	2,82
Absorción (%)	1,52
Masa unitaria Suelta (Kg/m ³)	1474,36
Masa unitaria Compacta (Kg/m ³)	1555,72
Vacíos %	47,72

Las propiedades físicas en conjunto indican que el material usado fue adecuado para uso de morteros y concretos con el diseño debidamente elaborado.

5.1.3 Curva granulométrica Fuller-Thompson

La granulometría de los agregados naturales comparando con la curva idealizada de Fuller-Thompson se aprecia en la Figura 27. Para obtener un diseño de concreto con una adecuada gradación y mejorar la capacidad de empaquetamiento en la mezcla, se definió con el método de Fuller-Thompson una curva combinada basada en la proporción de 42% agregado fino y 58% agregado grueso, seleccionada como óptima por aproximarse a la curva ideal como indica la Figura 28, esta combinación permitió aproximarse al perfil granulométrico deseado, favoreciendo la densificación del sistema granular en el diseño del concreto.

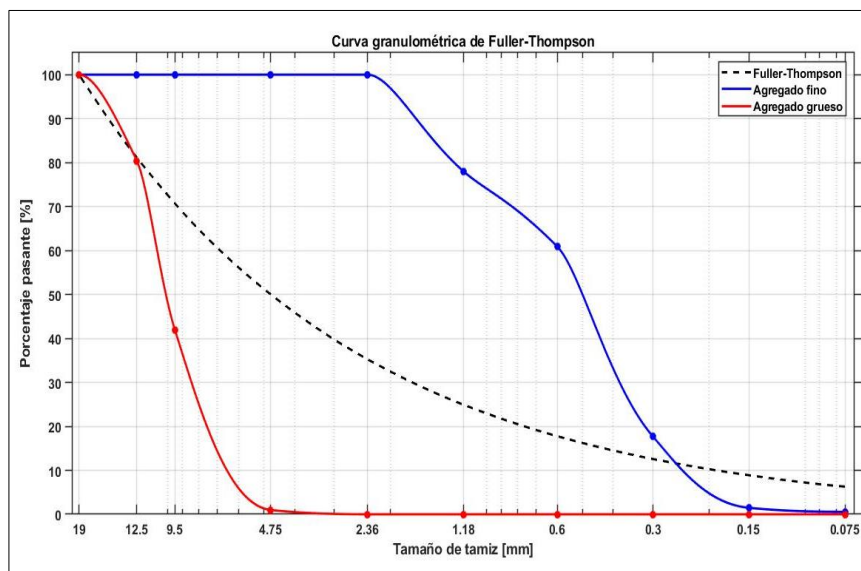


Figura 27 Curva granulométrica de Fuller idealizada. Fuente: propia.

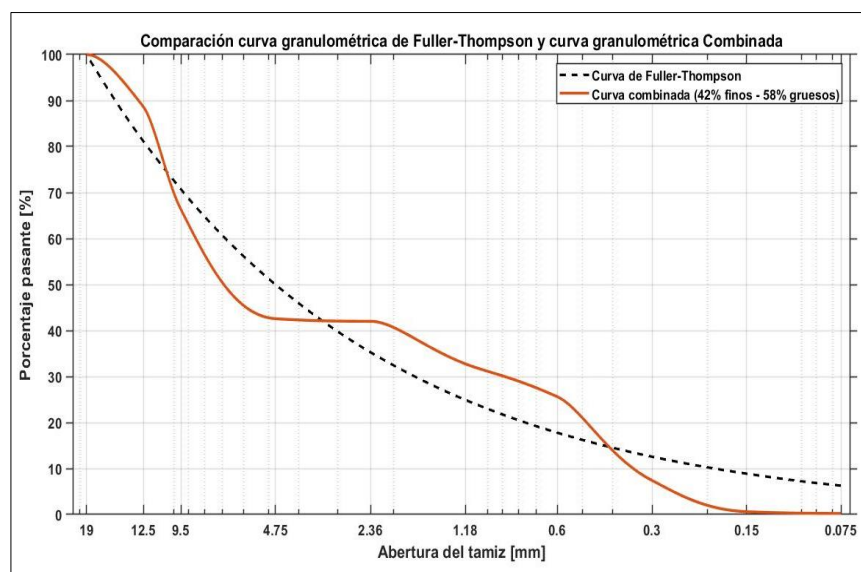


Figura 28 Curva granulométrica combinada para concreto. Fuente: propia.

5.1.4 Microscopia con estereoscopio

Este ensayo consistió en realizar una observación estereoscópica de veinte partículas del AR, midiendo de forma aproximada sus dimensiones en términos de alto y ancho. Los resultados mostraron una considerable variabilidad en formas, colores y tamaños, siendo coherente con la naturaleza irregular del material reciclado. Las dimensiones promedio de las partículas 0.372 ± 0.18 mm de ancho y 0.231 ± 0.11 mm de alto confirmando la heterogeneidad morfológica del material. La Figura 29 muestra evidencias del ensayo realizado en el estereoscopio.



Figura 29 Evidencias del ensayo realizado en el estereoscopio. Fuente: propia.

5.2 Propiedades físicas y mecánicas de morteros.

5.2.1 Ensayo de mesa de flujo

La Tabla 10 presenta los resultados de índice de fluidez en función de la relación agua/cementos empleada para el diseño de morteros. Se observó que dicha relación disminuyó progresivamente a medida que se incrementó la sustitución de arena por el agregado reciclado, pasando de 0.69 en la mezcla de referencia a 0.64 con 2.5%, 0.61 con 5%, 0.6 con 7.5% y a 0.59 con el 10% de reemplazo. La fluidez del mortero estuvo dentro del rango esperado, con el valor más bajo de 110 mm y el más alto 114 mm para el reemplazo del 7.5% y 10% respectivamente. Este comportamiento se asocia con las propiedades hidrofóbicas del PEBD-Al, material que, al no absorber agua, actuó como un lubricante interno, facilitando el movimiento entre partículas y mejorando la fluidez del mortero, permitiendo mantener una adecuada trabajabilidad incluso con relaciones de agua/cemento más bajas. Estos resultados son congruentes con (Dumre et al., 2024) que también evidenció un aumento de la trabajabilidad conforme se incrementó el contenido del plástico de 2.5%, 5%, 7.5% y 10% de desechos de PET como sustituto de arena. De manera similar, (Koirala et al., 2025) observaron que la inclusión de PET en morteros aumentó la trabajabilidad para porcentajes de 5%, 10% y 15% en reemplazo de arena atribuyéndole estos resultados a la menor absorción de agua y menor contenido de finos.

Tabla 10. Resultados ensayo de mesa de flujo Fuente: propia.

Porcentaje de Reemplazo, %	Agua/OPC	Fluidez (mm)
0	0,69	111
2,5	0,64	113
5,0	0,61	112
7,5	0,60	114
10	0,59	110

El ensayo de la mesa de flujo se realizó para todos los porcentajes de sustitución. La Figura 30 muestra parte del proceso de este ensayo.



Figura 30. Ensayo de Fluidez para morteros. Fuente: propia.

5.2.2 Resistencia a la compresión de morteros

La Figura 31 muestra los valores promedio de la resistencia a compresión para morteros con sustitución de agregado finos en proporciones del 2.5%, 5%, 7.5%, y 10% evaluados en edades de curado de 7 y 28 y días. Se observó una reducción progresiva de resistencia a medida que aumentó el contenido del agregado reciclado (AR) en todas las edades. La mezcla de referencia alcanzó los valores más altos, mientras que el valor más alto con agregado reciclado fue la mezcla con 2.5% de reemplazo registró los mejores resultados entre los morteros modificados con valores de 7.05 MPa a 7 días, y 10.48 MPa a 28 días. Por el contrario, la mezcla con 10% de reemplazo presentó los valores más bajos de 1.66 MPa a 7 días, y 2.35 MPa a 28 días, presentando pérdidas superiores al 85% respecto a la mezcla de referencia.

La reducción de la resistencia con el 2.5% y 5% de AR fue más pronunciada por el debilitamiento de la zona de transición interfacial que generó mayor porosidad y microfisuras, igualmente que con los porcentajes de 7.5% y 10% pero con un menor impacto relativo manteniendo una baja adherencia entre las partículas del AR y la pasta cementante, compatible con (Ohemeng & Ekol, 2019) quienes documentaron una caída en la

resistencia desde los 45.4MPa para la mezcla de control hasta el 7.91MPa al reemplazar 60% del agregado fino con PEBD. De manera similar (Kunthawatwong et al., 2022) observaron valores de 49.5 MPa, 28.9 MPa y 22.5 MPa al sustituir 0%, 10% y 20% de arena con desechos de PET, respectivamente, atribuyendo este comportamiento a la impermeabilidad del material y una degradación de la zona de transición interfacial.

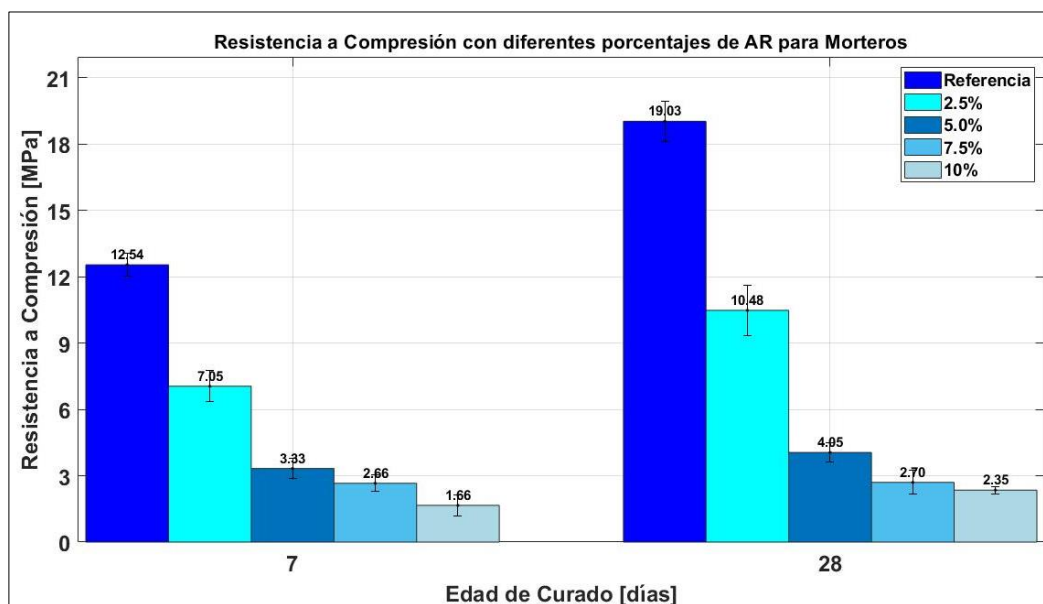
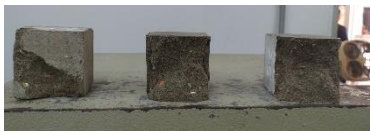


Figura 31 Resultados de ensayo a compresión para morteros. Fuente: propia.

De acuerdo con las ASTM C270, que clasifica los morteros según la resistencia a la compresión a los 28 días, la mezcla de 0% de sustitución corresponde al tipo M, la del 2.5% al tipo N y a las del 5% y 7.5% al tipo O cada una con aplicaciones propias dentro de sistemas de albañilería. La Tabla 11 muestra las evidencias de los morteros ensayados.

Tabla 11 Evidencias ensayo compresión morteros. Fuente: propia.

% AR	7 días	28 días
0		
2.5		
5		



5.2.3 Ensayo de Resistencia a Flexión

Los resultados que muestra la Figura 32 de resistencia a la flexión evidenciaron una reducción sostenida a medida que aumentó el porcentaje de reemplazo de agregado reciclado. La mezcla con 0% de sustitución alcanzó el mayor valor con 4.42 MPa a 28 días, mientras que la mejor mezcla con AR fue la de 2.5%, con 1.99 MPa a 28 días. El valor más bajo correspondió a la mezcla con 10% de sustitución, con apenas 0.69 MPa. De manera similar a lo observado en los resultados de compresión, todas las mezclas mostraron un aumento de resistencia entre los 7 y 28 días; no obstante, las ganancias fueron marginales en los porcentajes más altos de sustitución, lo que sugiere una posible limitación en la evolución de esta propiedad debido a la mayor presencia del AR.

La pérdida de resistencia a flexión con el aumento del contenido del material reciclado, puede atribuirse a que el PEBD es un material sin adecuada adherencia con la matriz cementante, condición que generó zonas débiles en su estructura interna, dificultando la transmisión de esfuerzos cuando es sometido a una carga transversal. Estos resultados son coherentes con (Ohemeng & Ekolu, 2019) que encontraron una misma tendencia, donde con una relación de agua/cemento de 0.6 la sustitución 5% de PEBD produjo una resistencia de 4.54 MPa, que disminuyó a 4.43 MPa y 4.09 MPa para 10% 20% respectivamente e igual forma para (Kunthawatwong et al., 2022) reportaron reducciones en la resistencia a la flexión al incorporar desechos de PET en los finos, obteniendo valores de 5.0 MPa y 3.7 MPa para sustituciones de 10% y 20% respectivamente.

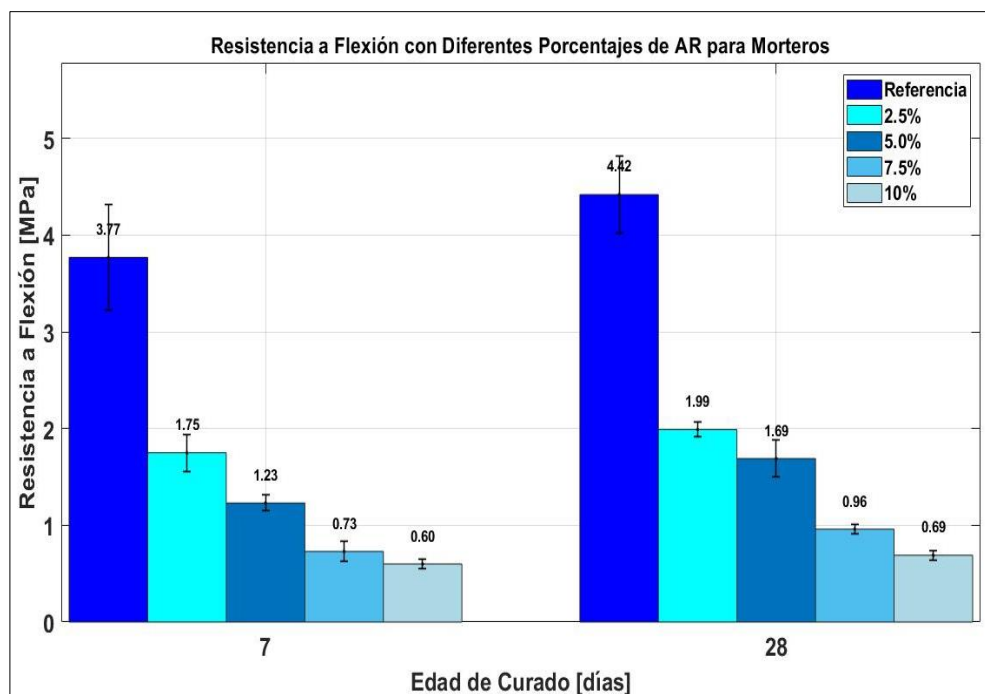


Figura 32 Resultados para resistencia a flexión para morteros. Fuente: propia.

5.2.4 Ensayo de densidad, absorción y porosidad

La Tabla 12 indica los resultados de densidad, absorción y volumen de vacíos de acuerdo con la norma ASTM C642. El mortero de referencia obtuvo un valor de densidad de $2.52 \pm 0.14 \text{ g/cm}^3$, mientras los morteros con 2.5% y 5% de AR tuvieron valores de $2.16 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ y $2.13 \pm 0.04 \text{ g/cm}^3$ respectivamente, registrando una disminución en su densidad con una tendencia igual a la determinada por (Ohemeng & Eklou, 2019) y por (Kunthawatwong et al., 2022) que atribuyeron dicha reducción a la baja gravedad específica del AR y a la mala adherencia de la pasta cementante que favoreció a la formación de microgrietas en la zona de transición interfacial y aumentó los vacíos y canales de absorción de agua. Por otro lado, las mezclas de 7.5% y 10% mostraron valores de $2.21 \pm 0.08 \text{ g/cm}^3$ y $2.31 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ respectivamente, aumentando levemente la densidad sobre los otros reemplazos, pero siempre inferior al mortero de referencia. El aumento de densidad en los reemplazos de 7.5% y 10% se puede considerar como valores atípicos debido posiblemente al proceso desarrollado en laboratorio.

Para definir el porcentaje más adecuado de sustitución volumétrica de agregados finos por el agregado reciclado se escogió de acuerdo con el criterio de resistencia a la compresión, densidad y absorción como variables importantes para esta investigación, de esta forma se optó por utilizar 5% de sustitución porque tuvo la una resistencia adecuada, una menor densidad y un valor moderado en absorción y porosidad.

Tabla 12 Resultados ensayo de propiedades físicas para morteros Fuente: propia.

% AR	Densidad Aparente (g/cm ³)	Absorción %	Volumen de Vacíos (cm ³)
0	2.52 ± 0.14	13.72 ± 0.21	25.98 ± 1.18
2,5	2.16 ± 0.01	14.43 ± 0.51	25.05 ± 7.25
5	2.13 ± 0.04	13.86 ± 1.93	38.42 ± 1.97
7,5	2.21 ± 0.08	14.41 ± 0.41	43.5 ± 1.29
10	2.31 ± 0.02	15.4 ± 0.96	47.54 ± 1.2

5.3 Resultados de propiedades mecánicas y físicas de concretos

Después de la combinación granulométrica definida mediante el método de Fuller-Thompson y con base en la norma ACI 211 descrito en el apartado 5.1, se definió las proporciones volumétricas y de masa para 1 m³ de concreto para ambas mezclas, como muestra la Tabla 13. La mezcla de referencia se elaboró con una relación de agua/cemento de 0.58 y la mezcla con agregado reciclado (AR) se diseñó con una relación agua/cemento de 0.45.

Tabla 13 Cantidad de materiales para 1 m³ de concreto. Fuente: propia.

Material	Mezcla Referencia % volumen	Mezcla AR % volumen	Mezcla Referencia Kg/m ³	Mezcla AR Kg/m ³
Cemento	0,116	0,116	365,42	365,42
Arena	0,281	0,267	735,63	722,23
Grava	0,391	0,391	1023,41	1023,41
Agua	0,212	0,164	211,94	164.43
PEBD-AI	0	0,014	0	14,355

5.3.1 Ensayo de asentamiento

El ensayo de asentamiento se realizó conforme a la ASTM C143 estableciendo como valor objetivo de 100 mm ± 25 mm, basado en las recomendaciones de la ACI 211. Este rango corresponde a una mezcla de consistencia fluida tradicional que favorece la colocación y compactación.

En la mezcla de referencia con una relación de agua/cemento de 0.58, se obtuvo un asentamiento de 104 mm valor que se mantuvo en el rango establecido y garantizó una trabajabilidad óptima. En la mezcla con agregado reciclado, fue necesario reducir la relación agua/cemento a 0.45 debido a la baja o nula absorción del material reciclado, que presentó mayor cantidad de agua libre, y tendió a incrementar el asentamiento, tal como lo reportaron (Saikia & De Brito, 2014) y (Ali et al., 2021). La reducción de dicha relación permitió mantener una trabajabilidad adecuada, alcanzando un asentamiento de 76 mm.

Ambas mezclas obtuvieron una fluidez aceptable evitando segregación y facilitando su compactación, la Figura 33 muestra el asentamiento para la mezcla de referencia y la el asentamiento de la mezcla con agregado reciclado.

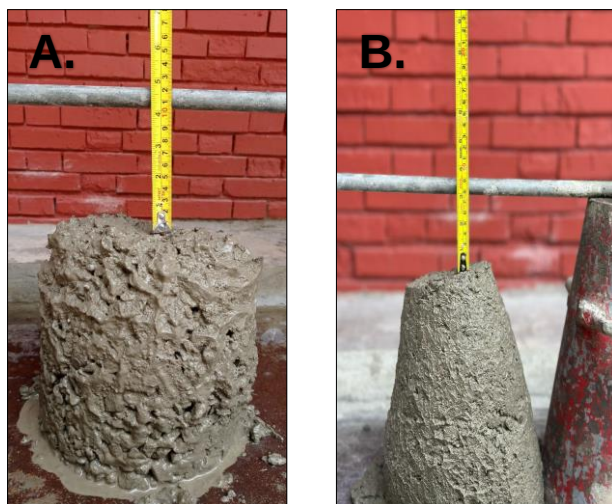


Figura 33. Asentamiento para concretos. A) Referencia, y B) Agregado Reciclado.
Fuente: propia.

5.3.2 Ensayo de resistencia a la compresión

La resistencia a compresión del concreto se evaluó a los 7 y 28 días conforme a la norma ASTM C39. Los resultados indicaron que la mezcla de referencia presentó una resistencia promedio de 18.16 MPa a los 7 días y de 22.79 MPa a los 28 días, evidenciando un crecimiento aproximado de 25% entre ambas edades. Por su parte, la mezcla con agregado reciclado alcanzó una resistencia de 11.54 MPa a los 7 días y de 17.76 MPa a los 28 días, lo que representó un incremento de 54% en ese mismo intervalo. La Figura 34 representa los datos mencionados. Aunque la resistencia inicial del concreto reciclado fue inferior a la mezcla de referencia, su comportamiento mostró una ganancia progresiva con el tiempo de curado.

Factores como la naturaleza hidrofóbica que restringe la hidratación del cemento, y la débil fuerza adhesiva entre el AR con la matriz cementicia provocaron el debilitamiento de la zona de transición interfacial aumentando la cantidad de vacíos y con ello la disminución de la resistencia a compresión de la mezcla con AR frente a la mezcla de referencia como lo registraron (Galvão et al., 2011) (Ali et al., 2021), (Jibrin Sule et al., 2017), (Choi et al., 2009), (Saikia & De Brito, 2013) y (Ababio Ohemeng et al., 2014b).

Por ejemplo, (Galvão et al., 2011) investigó el efecto de PEBD y PET en concreto con sustituciones volumétricas por agregados finos en porcentajes desde 0.5% hasta el 7%, la resistencia a compresión presentó una tendencia de incremento hasta el 1% de sustitución en ambas edades de curado, luego de este porcentaje la resistencia disminuyó levemente para ambos casos de plástico. Para la sustitución del 5% a los 28 días fue de 28 MPa y 33 MPa para el PEBD y PET respectivamente, valores superiores a lo encontrado en la presente investigación. También (Jibrin Sule et al., 2017) que reemplazó PEBD por finos, en porcentajes de volumen de 5%, 10%, 15%, 20%, y 30% a edades de 7 y 28 días, el comportamiento general fue una disminución de la resistencia a compresión en la medida

que aumentaba el porcentaje de plástico. El estudio referido a los 28 días alcanzó una resistencia a la compresión de 20.44 MPa con un porcentaje de 5%, levemente superior al valor de 17.76 MPa de la presente investigación.

No obstante, la resistencia obtenida a los 28 días en la mezcla de agregado reciclado está dentro del rango aceptable para aplicaciones de baja exigencia mecánica de acuerdo con la NSR -10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010), es decir; se puede utilizar para elementos estructurales en edificaciones de baja exigencia como viviendas de 1 o 2 pisos o para elementos no estructurales, como andenes, sardineles, elementos prefabricados ligeros, entre otros.

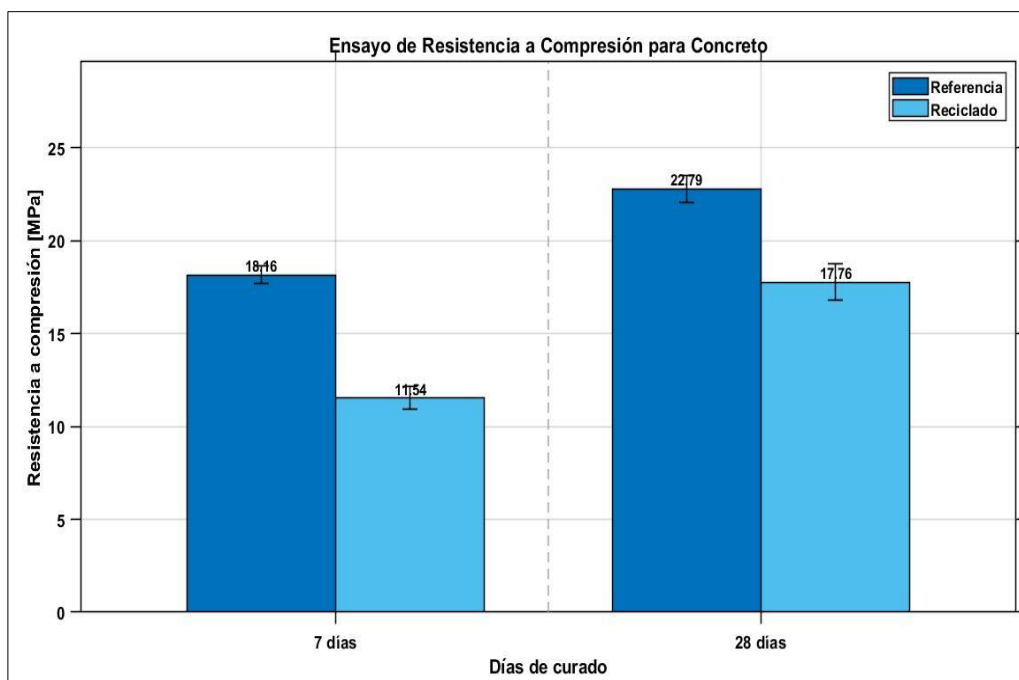


Figura 34 Resultados de resistencia a compresión para concretos. Fuente: propia.

La Figura 35 indica la evidencia el modo de falla de los ensayos de resistencia a compresión para la mezcla de referencia y la mezcla con agregado reciclado respectivamente, como se pudo apreciar en ambos casos los modos de falla se caracterizaron por una combinación de agrietamiento en la parte superior con una separación inclinada en el cuerpo del espécimen asociada a la falla tipo 4 de acuerdo a la norma ASTM C39.

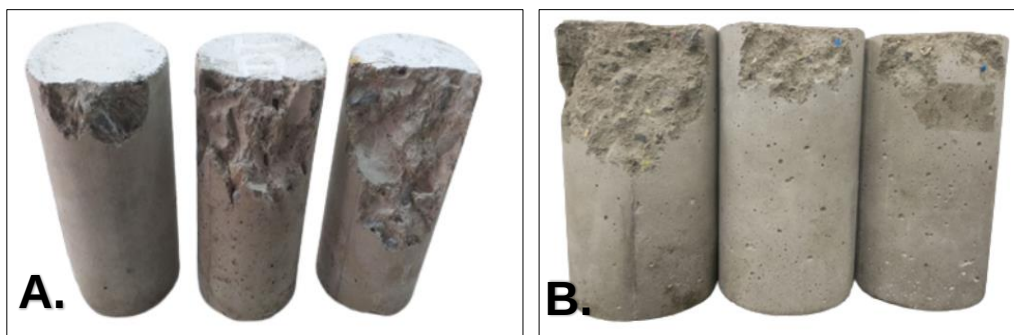


Figura 35 Evidencia ensayo a compresión A) Referencia, y B) Agregado Reciclado
Fuente: propia.

5.3.3 Ensayo de resistencia a la flexión

La Figura 36 reflejó los valores de resistencia a flexión para el concreto de referencia y el concreto con agregado reciclado, a una edad de 28 días. La mezcla de referencia presentó una resistencia de 3.25 ± 1.13 MPa y la mezcla de estudio un valor de 3.54 ± 0.28 , levemente superior al concreto convencional. La diferencia entre ambas mezclas se explica posiblemente por la mayor dispersión de datos observada en los resultados de referencia, atribuida a una de las tres probetas ensayadas con un valor atípico. En este sentido, la aparente mejora del AR no puede interpretarse como un incremento real en la resistencia a flexión, sino como una variación asociada al comportamiento heterogéneo de las probetas.

Lo anterior coincide con lo reportado por (Ababio Ohemeng et al., 2014b) que utilizaron PEBD como reemplazo de la arena en volumen, con porcentajes 10%, 20%, 30%, 40%, 50% y 60% obtuvo valores desde 4.97 MPa hasta 2.83 MPa evidenciando una reducción progresiva, y (Saikia & De Brito, 2014) reemplazaron volumétricamente el 5%, 10% y 15% del agregado fino por gránulos de PET, registraron una reducción desde los 5.0 MPa hasta 4.4 MPa. Estos resultados confirman que la incorporación del agregado plástico debilitó la zona de transición interfacial y redujo la resistencia a la flexión.

En consecuencia, se concluyó que el comportamiento real del concreto con AR correspondió a una disminución en el desempeño mecánico, más que a una mejora, a pesar de lo que sugirieron los valores promedios de este ensayo.

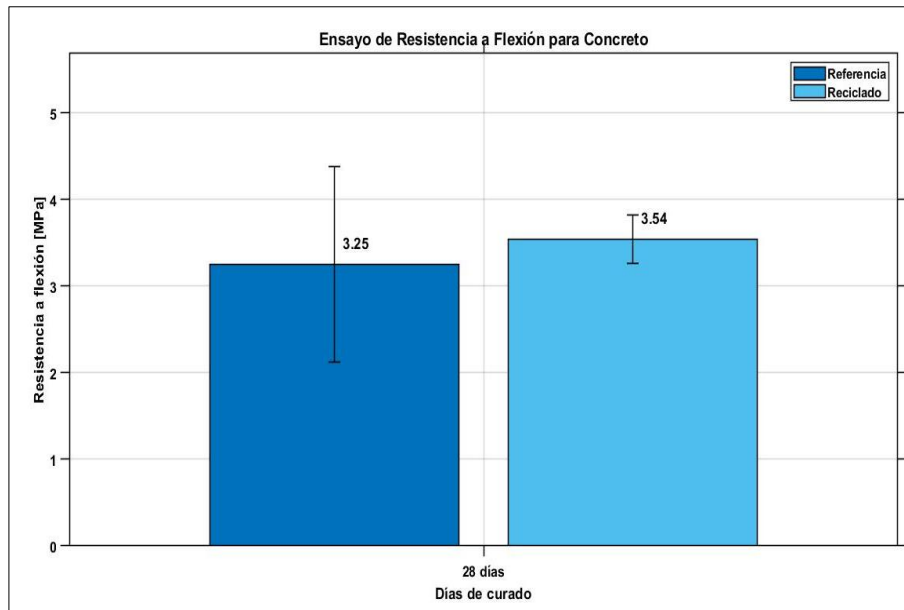


Figura 36 Resultado de resistencia a flexión para concretos. Fuente: propia.

La Figura 37 presenta la fractura por tracción de las probetas de ambas mezclas de concreto. En ambos casos, las fallas se produjeron transversalmente en la región central, conforme a lo establecido por la norma ASTM C78. Sin embargo, en las probetas con agregado reciclado se evidenció un comportamiento más dúctil en la etapa posterior a la carga máxima, ya que la propagación de la grieta principal fue más lenta y el espécimen mantuvo capacidad residual de carga después de la fisuración. Este efecto puede atribuirse al fenómeno de puenteo de las partículas plásticas en la zona de fractura, las cuales retrasan la apertura completa de la grieta y evitan una rotura frágil inmediata. Un comportamiento similar fue reportado por (Saikia & De Brito, 2013) quienes observaron que la incorporación de partículas plásticas en el concreto permitió que estas atravesaran la fisura y actuaran como elementos de anclaje, disminuyendo la velocidad de propagación de la fractura y mejorando la resistencia residual post-falla.

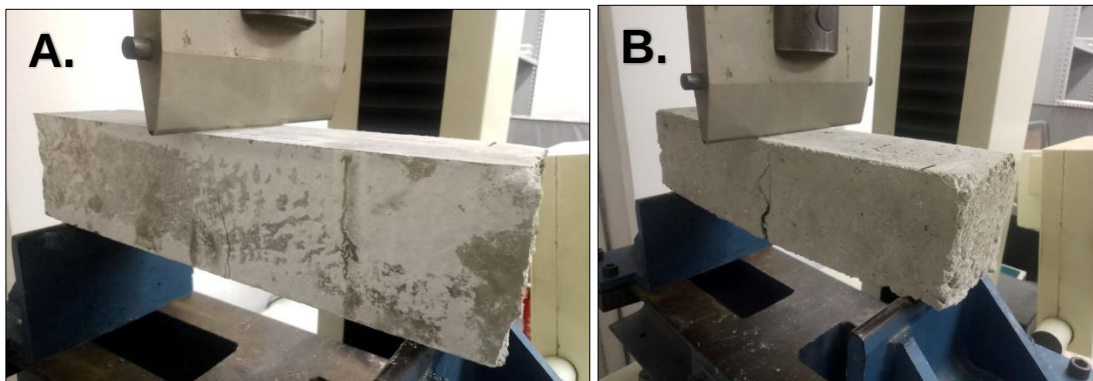


Figura 37 Evidencias ensayo a flexión A. Referencia B, AR. Fuente: propia.

5.3.4 Ensayo de resistencia a la tracción indirecta

La resistencia a la tracción indirecta evaluada a los 28 días de curado, presentó para la mezcla de referencia un valor máximo de $2,07 \pm 0,24$ MPa, mientras que al incorporar 5% de agregado reciclado su valor máximo fue de $1,7 \pm 0,26$ MPa, esto representó una disminución de aproximadamente el 18% y aproximadamente representaron el 10% del esfuerzo de resistencia a compresión. Esta reducción es coherente con el comportamiento de concretos con residuos plásticos caracterizados por tener mayor porosidad y una adherencia deficiente en la zona de transición interfacial como lo informaron (Galvão et al., 2011) que encontraron una tendencia decreciente en la resistencia a tracción indirecta al sustituir PET, teniendo valores máximos desde 3.7 MPa hasta 3.3 MPa con el 7.5% de sustituto, además de reportar una falla de naturaleza dúctil debido a la presencia de agregado plástico. De manera similar (Al-Tarbi et al., 2022) y (Saikia & De Brito, 2013) y (Ababio Ohemeng et al., 2014b) atribuyeron la disminución de la resistencia a tracción indirecta al débil enlace entre el AR y la matriz cementicia producto de la superficie lisa y de la porosidad que limitó la capacidad de anclaje mecánico. La Figura 38 indica los valores de resistencia a tracción del presente estudio.

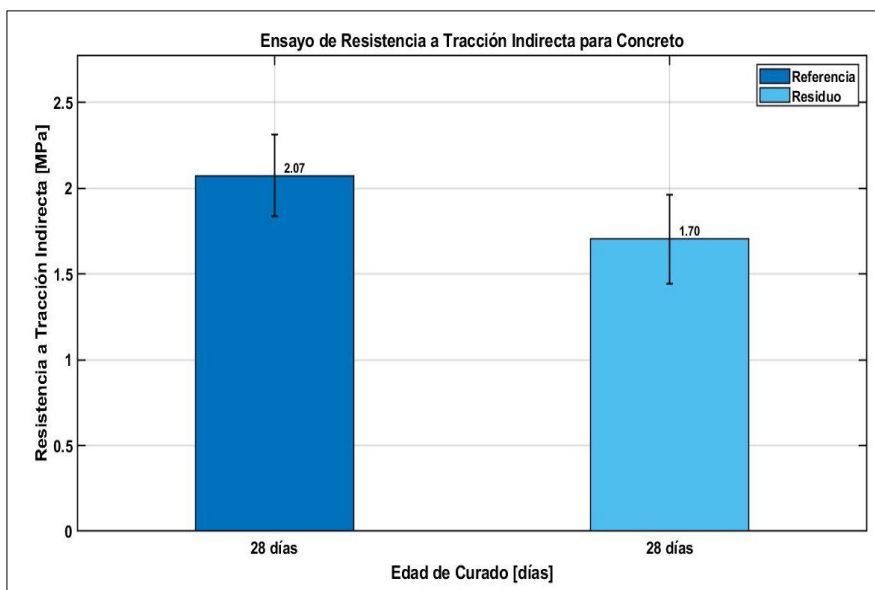


Figura 38 Resultados de resistencia a tracción indirecta para concretos. Fuente: propia.

En el ensayo realizado de acuerdo con la norma ASTM C496, los cilindros de concreto presentaron una fractura vertical a lo largo del plano de carga diametral, este tipo de falla se debió a esfuerzos de tracción inducidos perpendicularmente en la línea de aplicación de carga, hasta su rotura completa. La Figura 39 muestra las evidencias del ensayo.



Figura 39 Evidencia ensayo tracción indirecta A. Referencia B. AR Fuente: propia

5.3.5 Ensayo de absorción, densidad y porosidad.

La evaluación de la densidad a los 28 días evidenció que en la mezcla de concreto con AR alcanzó un valor de 2.47 g/cm^3 , inferior al de la mezcla de referencia que fue de 2.61 g/cm^3 . Esta diferencia del 5.4% confirmó la reducción en la densidad asociada a la incorporación del plástico, caracterizado por su baja densidad y alta porosidad que afecta directamente la masa volumétrica del compuesto conforme lo señalaron (Ali et al., 2021), (Saikia & De Brito, 2013). Comparando estos resultados con los de (Jibrin Sule et al., 2017) se observa una tendencia similar, dado que la mezcla convencional reportó una densidad de 2.47 g/cm^3 , valor que disminuyó a 2.45 g/cm^3 con 5% de PEBD sustitución. Es decir, en ambos casos la tendencia fue consistente: a mayor porcentaje de plástico, menor densidad del concreto. De acuerdo con lo anterior, los valores de absorción y volumen de poros fueron mayores en el concreto con agregado reciclado frente a la mezcla de referencia, como muestra la Tabla 14.

Tabla 14. Resultados ensayo de propiedades físicas para concretos. Fuente: propia.

Mezcla	Densidad Aparente (g/cm^3)	Absorción %	Volumen de poros permeables %
Referencia	$2,61 \pm 0,02$	$7,26 \pm 0,16$	$16,96 \pm 0,27$
Agregado reciclado	$2,47 \pm 0,12$	$7,47 \pm 0,44$	$17,52 \pm 0,5$

5.3.6 Prueba acústica

Se realizó la evaluación de la presión sonora en tres escenarios, el primero con la fuente directa, el segundo con la mezcla de referencia y el tercero con la mezcla de concreto con agregado reciclado. Los datos que indica la Figura 40 evidenció una reducción de la presión sonora de la muestra con agregado reciclado frente a la muestra de referencia, diferencias especialmente marcadas en las frecuencias bajas y altas. Por ejemplo, para la primera banda de frecuencia de referencia, la presión sonora del concreto de referencia fue de 60.4 dB y para el concreto con agregado reciclado fue de 54 dB.

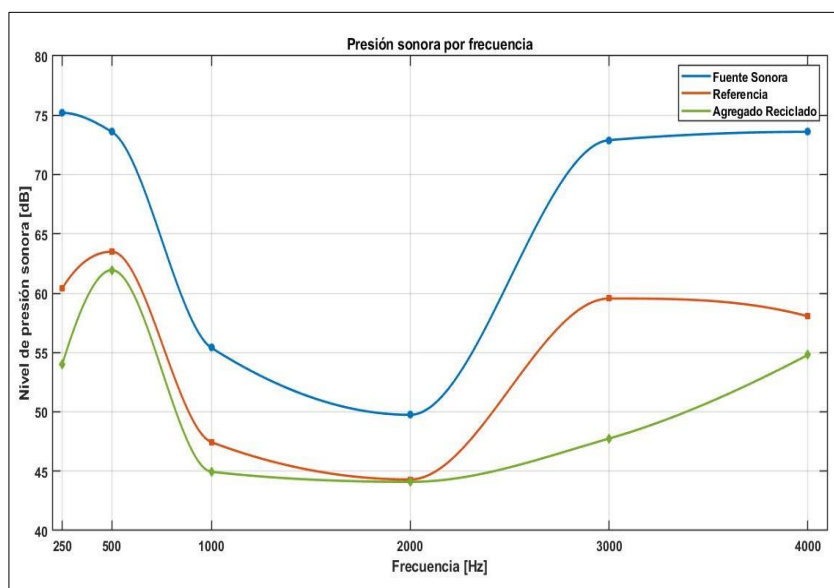


Figura 40 Presión sonora para concreto. Fuente: propia.

La Figura 41 indica los valores de la pérdida de transferencia acústica de acuerdo con la Ecuación 1, comparando los niveles de presión acústica frente a la fuente constante. Los resultados evidencian que la muestra con agregado reciclado presentó en la mayoría de frecuencias analizadas, una mayor pérdida de transferencia acústica. En particular, en la frecuencia de 3000Hz hubo la mayor diferencia entre ambas mezclas de concreto, con una pérdida de 25.15 dB para la muestra con agregado reciclado frente a 13.35 dB en la referencia. En contraste, a 2000 Hz la diferencia fue mínima, registrando pérdidas similares de 5.45 dB y 5.65 dB respectivamente. Estos resultados se relacionan en la investigación de (González B. et al., 2008) quienes al evaluar distintos materiales encontraron que los polímeros, en especial el poliuretano, presentó pérdidas de transmisión mayores a las de presente estudio. Por ejemplo, a 500 Hz, el concreto reciclado registró una pérdida de 11.65 dB, mientras el poliuretano alcanzó los 21.62 dB, de igual forma, a 400Hz, alcanzó 18.8 dB frente a los 29.96 dB correspondientemente. Desde luego el poliuretano obtuvo un desempeño acústico mayor por las características propias del material utilizado.

ampliamente para el aislamiento acústico. Sin embargo, es evidente que la inclusión del PEBD-Al en la matriz cementante contribuye parcialmente a la mejora del comportamiento acústico.

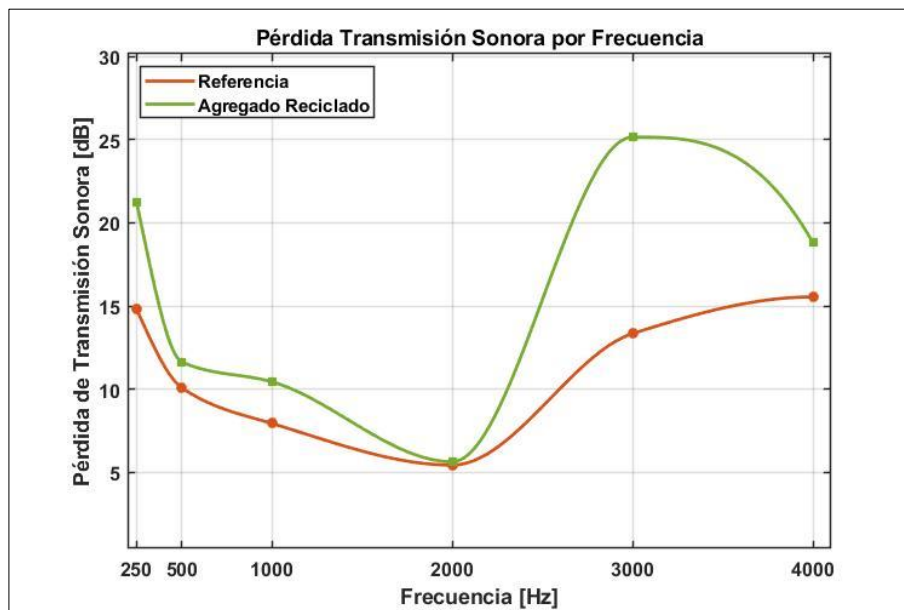


Figura 41 Pérdida transmisión sonora para concretos. Fuente: propia.

La tendencia que muestra la Figura 41 frente a la pérdida de transferencia acústica indicó que la incorporación de PEBD-Al influyó en la reducción de la presión sonora transmitida en las diferentes bandas de frecuencia, asociándose a la porosidad del concreto con AR que posiblemente permitió absorber la energía acústica transformándola en otro tipo de energía como calor o vibración interna de acuerdo a (González B. et al., 2008). Esta caracterización de pérdida de transmisión sonora permitió identificar que el comportamiento fue dependiente de la frecuencia de incidencia. Por ejemplo, en la frecuencia de 3000 Hz se alcanzaron los mayores valores de pérdida, afectando sonidos como timbres electrónicos modernos, cantos agudos de aves, y señales de alarma de alta frecuencia. En contraste para la frecuencia de 2000Hz la disminución se limitó entre 5 y 10 dB, correspondiendo a una atenuación parcial de timbres mecánicos, goteos de agua, algunas vocales formantes, así como algunas sirenas. En la frecuencia entre 250 Hz y 1000 Hz se observó una pérdida intermedia entre 10 y 15 dB en la que se ven comprometidos sonidos como motores, tráfico vehicular, electrodomésticos y voces graves. Este análisis de comparación con sonidos conocidos se realizó con base en el audiograma de la Figura 3.

5.3.7 Ensayo de propiedades térmicas

Se realizaron ensayos de propiedades térmicas basadas en la ISO 22007-2 registrados en la Tabla 15. La conductividad térmica de la mezcla de referencia fue de 1.635 W/m·K, mientras que para la mezcla con agregado reciclado fue de 1.603 W/m·K representando una leve disminución, indicando que la capacidad de transmitir el calor no tiene un cambio sustancial con el reemplazo del agregado. Adicionalmente la difusividad térmica presentó una reducción en la mezcla con AR que implicó una menor capacidad del material para propagar calor en relación a su masa. Sin embargo, el calor específico del concreto reciclado fue mayor (1.243 MJ/m³·K) respecto al de la mezcla de referencia (0.844 MJ/m³·K), evidenciando que el material con AR requirió más energía para elevar su temperatura. Resultados similares muestran reducciones pero con mayor magnitud como (Záleská et al., 2018) quienes reportaron descensos de hasta un 86% en la conductividad térmica del concreto con adición de polipropileno (PP), atribuidos a la mayor porosidad generada por este material; mientras que (Ruiz-Herrero et al., 2016) observaron disminuciones de hasta una tercera parte respecto al concreto convencional, explicadas no solo por las características intrínsecas del plástico incorporado, sino también por el aumento en la tortuosidad del material.

Tabla 15. Propiedades térmicas del concreto. Fuente: propia

Mezcla	Conductividad térmica (W/m·K)	Difusividad térmica (mm ² /s)	Calor específico (MJ/m ³ ·K)
Referencia	1.635 ± 0,002	1.939 ± 0,028	0.844 ± 0,012
AR	1.603 ± 0,000	1.290 ± 0,007	1.243 ± 0,007

5.3.8 Ensayo de llama directa

La Figura 42 representa las curvas de exposición a llama directa en función del tiempo para la mezcla de referencia y la mezcla con agregado reciclado durante 900 segundos (15 minutos). En el caso de referencia se observó un incremento sustancial en los primeros 150 segundos alcanzando una temperatura de 970 °C en la cara incidente, después de los 150 segundos mostro una tendencia a estabilizarse a partir de los 1000°C. Mientras en la cara opuesta la temperatura mantuvo un incremento constante desde los 31.6 °C en los primeros 30 segundos hasta alcanzar una temperatura de 159.1°C a los 900 segundos.

En la mezcla de agregado con residuo durante los primeros 300 segundos de exposición, se observó un aumento progresivo de la temperatura en la cara incidente, alcanzado un valor de 1000.9 °C a los 300 segundos, mostrando una estabilidad hasta terminar el ensayo. En contraste la cara opuesta presentó un aumento térmico menor, partiendo de una temperatura cercana al ambiente de 30.2°C y alcanzando una temperatura de 143.7 °C al final del ensayo.

Para ambos casos se evidenció que, en los primeros segundos, aunque la cara expuesta a la llama tuvo temperaturas severas, en la cara posterior fueron temperaturas

considerablemente más bajas. Pero se destaca que el concreto con AR, presentó una menor temperatura en la cara opuesta al final del ensayo, lo cual coincide con los resultados obtenidos (Vallejo Camila & Villota Jorge, 2023) de (Vallejo Camila & Villota Jorge, 2023) donde se reemplazó residuos de corcho, caucho y poliestireno expandido en un 20% volumétricamente de agregado fino mostró que la temperatura máxima en la cara incidente en cada mezcla estuvo cerca de los 800 °C, mientras que, en la cara opuesta, en su mayoría tuvieron una temperatura inferior o igual a 200°C semejantes al presente estudio.

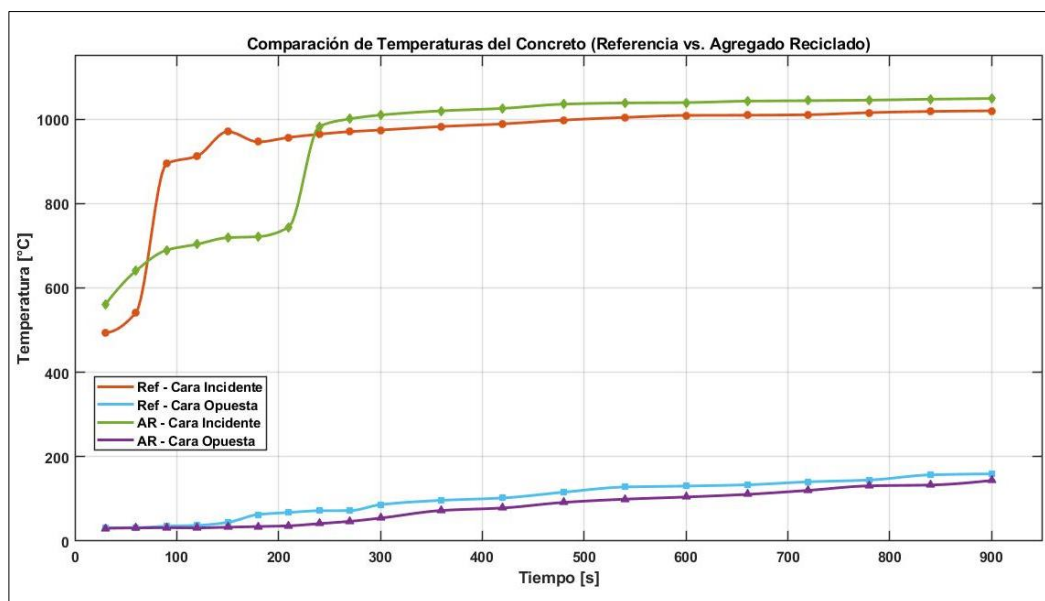


Figura 42 Temperatura de concreto de Referencia y con AR. Fuente: propia

Se calculó el flujo de calor Figura 43 a partir de la conductividad térmica reportada en la Tabla 15 y los datos del ensayo de llama directa, siguiendo la ecuación 2 (f. En general la mezcla con agregado reciclado presentó valores más altos a partir de los 210 segundos debido a un mayor gradiente, alcanzando un valor máximo de 37621.27 W/m² a los 300 segundos, frente a 36384.8 W/m² en la mezcla de referencia a los 150 segundos.

Luego de los 200 segundos, el flujo térmico aumentó de forma más pronunciada para la mezcla con agregado reciclado, indicando un ingreso de calor acelerado. A partir de los 240 segundos, los valores se estabilizaron por encima de los 36000 W/m², mientras que para la mezcla de referencia se estabilizó por debajo de los 34000 W/m².

Los resultados de la Tabla 15 corroboran los resultados del flujo térmico, porque en la mezcla de agregado con residuo por tener menor difusividad térmica el calor pudo no distribuirse adecuadamente y se acumuló en la superficie y aumentó el gradiente, además al tener mayor calor específico implicó necesitar mayor energía para calentarse internamente.

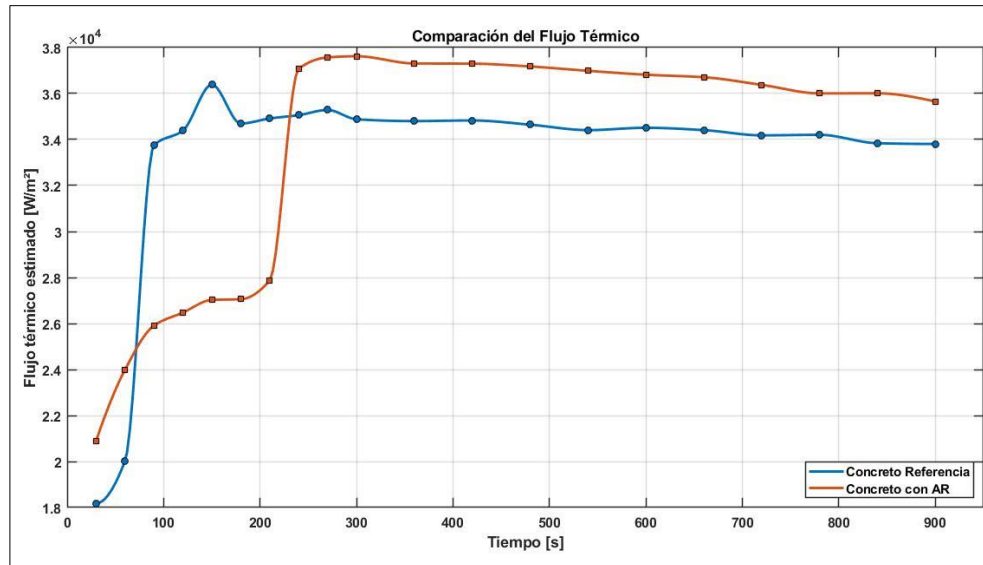


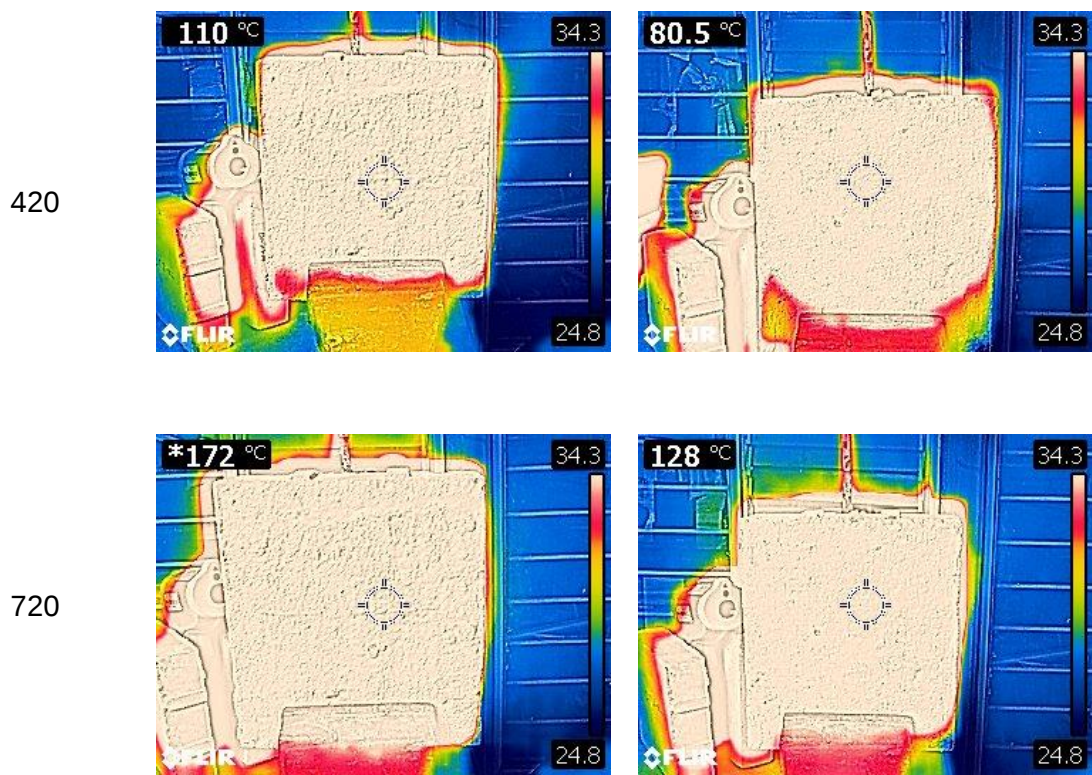
Figura 43 Comparación de flujo térmico para concretos. Fuente: propia.

Durante la realización del ensayo se tomaron capturas térmicas a los 180, 420 y 720 segundos en las caras opuestas a la llama para ambas mezclas. En las imágenes presentadas en la Tabla 16 se observó una distribución térmica progresiva representada por la escala de colores: las zonas con menor temperatura aparecieron en tonos azules y verdes, mientras que las áreas de mayor acumulación de calor se manifestaron en tonos amarillos, rojos y blancos.

En términos cuantitativos, la mezcla de referencia alcanzó temperaturas de 50.6 °C, 110 °C y 172 °C en los tiempos de 180, 420 y 720 segundos, respectivamente. En contraste, la mezcla con agregado reciclado presentó valores inferiores de 29.6 °C, 80.5 °C y 128 °C en los mismos intervalos de tiempo. Esta diferencia evidenció una menor transmisión del calor en el concreto con AR, lo que sugiere que la incorporación del plástico pudo aportar un efecto de aislamiento térmico, asociado a su menor conductividad térmica y mayor capacidad para generar microvacíos o porosidades en la matriz cementante.

Tabla 16 Imágenes termográficas del concreto. Fuente: propia.

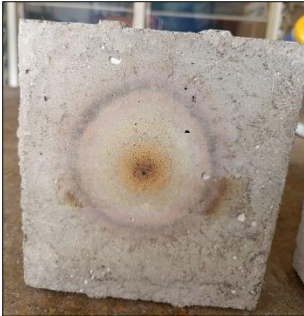
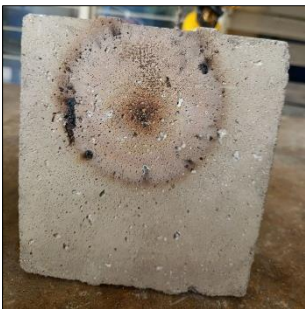
	Tiempo (s)	Referencia	Agregado Reciclado
180			



La Tabla 17 muestra evidencias físicas de la exposición al fuego de las placas y el deterioro del material. En ambos especímenes se observó la formación de una fisura vertical en la cara lateral superior, posiblemente causada por las tensiones térmicas internas inducidas por el gradiente de temperatura entre la cara incidente y la opuesta. Esta grieta respondió a la expansión desigual del concreto, generando una zona de debilidad que permitió la liberación de dichos esfuerzos.

Además, se evidenció una huella térmica significativa en la cara incidente, caracterizada por el ennegrecimiento superficial y desprendimiento parcial del material. El efecto fue más evidente en la mezcla con agregado reciclado, que coincide con los valores más altos de flujo térmico. En contraste, las caras opuestas presentaron una huella térmica menor en ambas mezclas, con una decoloración superficial sin desprendimientos visibles, que indicó una atenuación parcial del ingreso de calor a través del espesor de la placa.

Tabla 17 Registro fotográfico del ensayo de exposición a llama directa. Fuente: propia.

Falla	Referencia	Agregado Reciclado
Cara incidente		
Cara opuesta		
Cara lateral		

5.4 Resultados de propiedades mecánicas y físicas del elemento no estructural.

Se consideró realizar bloques de mampostería para identificar el comportamiento mecánico y físico para la mezcla convencional y la mezcla con agregado reciclado. El método de diseño fue igualmente basado en la norma ACI 211 y con el objetivo de tener una adecuada colocación, compactación y estabilidad dimensional se definió tener un asentamiento entre 0 y 25 mm. Por lo tanto, se disminuyó la relación de agua/cemento y la masa para 1 m³ de concreto se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18 Masa de materiales para 1 m³ de bloque de mampostería. Fuente: propia.

Material	Mezcla Referencia % volumen	Mezcla AR % volumen	Mezcla Referencia Kg/m ³	Mezcla AR Kg/m ³
Cemento	0,116	0,116	365,42	365,42
Arena	0,293	0,279	767,38	753,02
Grava	0,408	0,408	1067,57	1067,57
Agua	0,183	0,146	182,71	146,168
PEBD-A	0	0,015	0	14,355

5.4.1 Ensayo de asentamiento

El ensayo de asentamiento se realizó conforme a la ASTM C143, obteniéndose un valor de 0 mm para la mezcla convencional y de 5 mm para la mezcla con agregado reciclado, como se muestra en la Figura 44. Estos resultados corresponden a mezclas secas, elaboradas antes de su paso a la bloquera vibro compactadora. Para alcanzarlos, fue necesario ajustar la relación agua/cemento a 0.5 en el concreto de referencia y a 0.4 en el concreto con agregado reciclado. La reducción de esta relación en la mezcla con AR respondió a que la incorporación del agregado reciclado incrementó la trabajabilidad de la mezcla, lo que permitió emplear una menor cantidad de agua sin comprometer su colocación, en concordancia con lo reportado en (Bermudez et al., 2017).

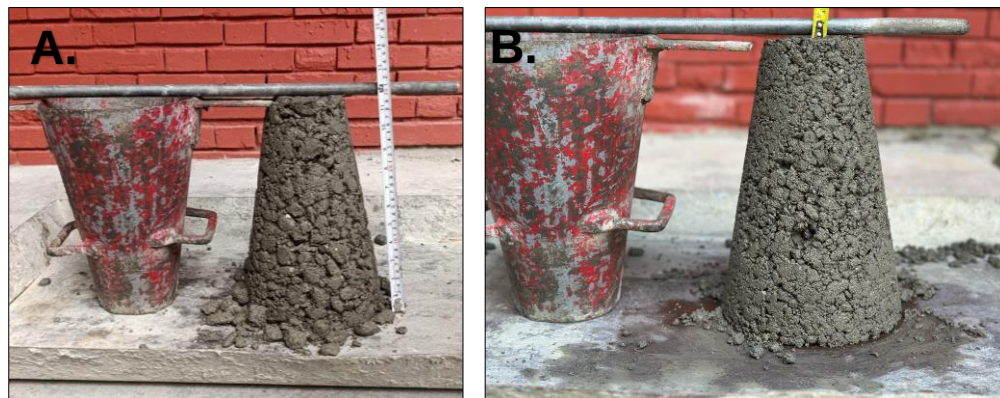


Figura 44. Ensayo de asentamiento para bloques de mampostería Fuente: propia.

5.4.2 Especificaciones del bloque

De acuerdo con la norma ASTM C90-24a ambas mezclas superaron la resistencia mínima de 13.8 MPa por lo que se clasificaron como elementos estructurales. El bloque de referencia obtuvo un valor de 14.079 MPa mientras el bloque con AR obtuvo un valor de 13.76 MPa, es decir, una reducción del 6.96% frente al valor inicial. Este resultado es relevante si se compara con datos inferiores como los de (Bermudez et al., 2017) y (García et al., 2012) quienes reportaron valores de 11.78 MPa y de 4.1 MPa respectivamente. En línea con esta tendencia, (Al-Tamimi et al., 2020) reportó un valor de 6.90 MPa en el bloque convencional, y de 3.84 MPa en bloques con polietileno, atribuyéndole la disminución a la débil unión en la interfaz entre la pasta-agregado plástico, que junto al carácter hidrofóbico del plástico resultó en el desplazamiento del plástico dentro de la matriz. Adicionalmente (Al-Tarbi et al., 2022) registraron una resistencia de 6.83 MPa en el bloque de referencia, frente a los 4.99 MPa en el bloque con 10% de sustitución de arena por PEBD, destacando que la hidrofobicidad del agregado plástico dificultó el paso del agua en el curado y comprometió la hidratación del cemento. En conjunto, la evidencia demuestra que la incorporación de plásticos reciclados tiende a reducir la resistencia a compresión de los bloques en comparación con las mezclas de control.

La absorción del bloque de referencia fue de 13.9% mientras que el bloque con AR fue de 12.3 %. Siguiendo una tendencia similar a la reportada por (Al-Tarbi et al., 2022) donde los bloques de referencia absorbieron 8.56% de agua, mientras que los bloques de PEBD, obtuvieron un valor de 6.75%, este comportamiento se lo atribuyeron a la baja proporción de PEBD y a la mayor presencia de agregado fino, lo que reducía los vacíos. En el presente caso, la disminución de absorción podría explicarse por el proceso de vibrocompactación, que favoreció el cierre de vacíos mediante vibración y presión, y por la tenacidad del AR, que permitió un mejor acomodo de partículas y redujo la conectividad de poros. En contraste, (Al-Tamimi et al., 2020) que usó un método de compactación manual encontró en el bloque de referencia una absorción de 5.85% mientras que el bloque con polietileno fue de 6.60% debido a la porosidad generada por la interfaz hidrofóbica del agregado plástico con la pasta cementante.

La mezcla de referencia al superar una densidad de 2000 kg/m³ se clasificó dentro del peso normal, coherente con su diseño, mientras que el bloque con agregado reciclado se ubicó en la categoría de peso medio, puesto que esta entre 1600 y 2000 kg/m³, esto concuerda con lo registrado por (Al-Tarbi et al., 2022) y (Al-Tamimi et al., 2020). La disminución de la densidad se presenta por el bajo peso específico del AR en comparación con el agregado fino. Esta reducción de peso en los bloques de mampostería resulta beneficiosa porque mejora las condiciones de trabajo, facilita su manipulación, disminuye la carga muerta sobre la estructura y, en consecuencia, puede reducir el costo final de la construcción.

La resistencia específica para el bloque de referencia fue de 6.3×10^{-3} (MPa*m³/kg) y para el bloque con agregado reciclado fue de 7.6×10^{-3} (MPa*m³/kg), es decir, la incorporación de PEBD-AR permitió obtener unidades más eficientes mecánicamente respecto a su densidad. Estos resultados concuerdan con (Choi et al., 2009) donde el concreto con 25 % de de

agregado plástico reciclado mostró una resistencia específica similar e incluso superior al concreto de control.

La Tabla 19 compila los resultados de las especificaciones de los bloques de mampostería.

Tabla 19 Características del bloque de mampostería. Fuente: propia.

Bloque	Resistencia a la Compresión (MPa)	Absorción %	Densidad (kg/m³)	Resistencia específica (MPa*m³/kg)
Referencia	14,79 ± 7,16	13.9	2345.70	0.0063
Agregado Reciclado	13,76 ± 1,32	12.3	1810,77	0.0076

6 CONCLUSIONES

La elaboración de las mezclas de morteros con sustitución volumétrica de 2.5%, 5%, 7.5% y 10% por agregado fino permitió identificar que las resistencias mecánicas como compresión y flexión fueron inferiores a la mezcla convencional, sin embargo, las mezclas con 2.5% pudo ser clasificada como mortero tipo N y las de 5%, 7% en tipo O.

El diseño de concreto con una sustitución del 5% permitió determinar un concreto que respondió adecuadamente a la resistencia a compresión que puede tener diferentes usos para elementos no estructurales y estructurales de resistencia mínima, así como la resistencia a flexión que puede categorizarse para fabricación de elementos prefabricados. Adicionalmente la densidad del concreto con AR indicó ser un 5% más liviano que el convencional.

Frente a las propiedades acústicas el concreto con AR resultó ser una mezcla que a frecuencias de 2000 Hz y 3000 Hz funcionan como un aislante acústico permitiendo mayor confort en espacios que reduce sonidos habituales al oído humano. Mientras en las propiedades térmicas y llama directa evidenciaron que la presencia del AR permitió ser mejor aislante térmico, que al aumentar la porosidad del compuesto, actuó una barrera para el transporte del calor a través del material.

Las propiedades mecánicas como la resistencia a compresión del bloque de mampostería evidenciaron que la mezcla con AR permitió clasificarlo como un elemento estructural, superando los 13 MPa exigidos normativamente y adicionalmente obtuvo un mejor desempeño en su resistencia específica indicando que es más eficiente estructuralmente frente a cada unidad de peso.

Se recomienda el uso de aditivos superplastificantes, con el fin de compensar la pérdida de resistencia mecánica observada en la mezcla con agregado reciclado porque puede permitir mejorar la hidratación del cemento, y además se puede reducir la relación agua/cemento sin perjudicar la trabajabilidad, que puede favorecer a un mejor desempeño en las propiedades mecánicas.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Ababio Ohemeng, E., Paa-Kofi Yalley, P., Dadzie, J., & Dzifa Djokoto, S. (2014a). *Utilization of Waste Low Density Polyethylene in High Strengths Concrete Pavement Blocks Production*. 6(5). www.iiste.org
- Ababio Ohemeng, E., Paa-Kofi Yalley, P., Dadzie, J., & Dzifa Djokoto, S. (2014b). *Utilization of Waste Low Density Polyethylene in High Strengths Concrete Pavement Blocks Production*. 6(5). www.iiste.org
- Abbas, S. N., & Qureshi, M. I. (2025). Effect of recycled plastic aggregates on mechanical and durability properties of concrete: A review. *Materials Chemistry and Physics: Sustainability and Energy*, 3, 100016. <https://doi.org/10.1016/j.macse.2025.100016>
- Acevedo Cristian. (2022). *Evaluación de la factibilidad de obtención de un mortero de revestimiento a partir de residuos de ladrillo, mortero y poliestireno expandido provenientes de residuos de construcción y demolición*.
- Advanced Bionics AG and affiliates. (2016). *Audiograma de Sonidos Familiares*.
- Agencia Federal para el Manejo de Emergencias. (2012). *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage-A Practical Guide FEMA E-74*. <http://www.fema.gov/earthquake-publications/fema-e-74-reducing-risks-nonstructural-earthquake-damage>
- Ali, K., Qureshi, M. I., Saleem, S., & Khan, S. U. (2021). Effect of waste electronic plastic and silica fume on mechanical properties and thermal performance of concrete. *Construction and Building Materials*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122952>
- Al-Tamimi, A. S., Baghabra Al-Amoudi, O. S., Al-Osta, M. A., Ali, M. R., & Ahmad, A. (2020). Effect of insulation materials and cavity layout on heat transfer of concrete masonry hollow blocks. *Construction and Building Materials*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119300>
- Al-Tarbi, S. M., Baghabra Al-Amoudi, O. S., Al-Osta, M. A., Al-Awsh, W. A., Ali, M. R., & Maslehuddin, M. (2022). Development of eco-friendly hollow concrete blocks in the field using wasted high-density polyethylene, low-density polyethylene, and crumb tire rubber. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 1915–1932. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.027>
- American Concrete Institute. (1991). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91) Chairman, Subcommittee A*.
- American Concrete Institute. (2013). *ACI CT-13 ACI Concrete Terminology*. www.concrete.org
- Anand, & Hamdan, A. (2022). Impact of partial replacement of coarse aggregate with electronic plastic waste on compressive strength of concrete. *Materials Today: Proceedings*, 56, 143–149. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.573>

- Askeland, D. R. (2022). *The science and engineering of materials*. PWS Pub.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Norma Sismo Resistente Col*.
- ASTM. (2017). *Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0496_C0496M-17
- ASTM. (2019). *Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19
- ASTM. (2020a). *Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0040_C0040M-20
- ASTM. (2020b). *Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0143_C0143M-20
- ASTM. (2020c). *Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0792-20>
- ASTM. (2021a). *Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0642-21>
- ASTM. (2021b). *Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0642-21>
- ASTM. (2021c). *Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0348-21>
- ASTM. (2021d). *Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C1437>
- ASTM. (2022a). *Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0078_C0078M-22
- ASTM. (2022b). *Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0128-22>
- ASTM. (2023). *Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0029_C0029M-23
- ASTM. (2024a). *Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0192_C0192M-24
- ASTM. (2024b). *Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-24
- ASTM. (2024c). *Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 50mm [2 in.] Cube Specimens)*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-24
- ASTM. (2024d). *Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0127-24>

- Bancolombia, S. A., & Establecimiento, B. (2020). *Guía Práctica de Construcción Sostenible*.
- Bermudez, A., Jonathan, P., & Tovar, A. (2017). *BLOQUES PARA MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL A PARTIR DE MATERIALES NO CONVENCIONALES*.
- Cano, M., & Avia, J. S. (2010). *Aislantes Térmicos - Criterios de Selección por Requisitos Energéticos*.
- Castillo, J., & Costa, A. (2012). *Características Físicas de Materiales Absorbentes Sonoros Poros*.
- Choi, Y. W., Moon, D. J., Kim, Y. J., & Lachemi, M. (2009). Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2829–2835. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036>
- DANE. (2022). *Boletín Técnico Indicadores económicos alrededor de la construcción (IEAC) Corte diciembre 07 de 2022 Indicadores Económicos Alrededor de la Construcción (IEAC)*.
- Dumre, G., Bhat, K. R., & Gyawali, T. R. (2024). Investigation on properties of mortar with the use of simply shredded post-consumer plastic waste aggregate and molasses. *Heliyon*, 10(21). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39881>
- Duque, I., & Ramírez, M. (2018). *Estrategia climática de largo plazo de Colombia E2050 para cumplir con el Acuerdo de París República de Colombia Presidente de la República Iván Duque Márquez Ministerio de Relaciones Exteriores Ministra de relaciones exteriores*.
- Edike, U. E., Ameh, O. J., Yohanna, H. S., Osuizugbo, I. C., & Nduka, D. O. (2024). Mechanical Properties of Concrete Blocks Incorporating Recycled Waste Plastic. *Materials Circular Economy*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s42824-024-00101-4>
- Eštoková, A., Wolfová Fabiánová, M., & Ondová, M. (2022). Concrete Structures and Their Impacts on Climate Change and Water and Raw Material Resource Depletion. *International Journal of Civil Engineering*, 20(6), 735–747. <https://doi.org/10.1007/s40999-022-00701-8>
- Galvão, J. C. A., Portella, K. F., Joukoski, A., Mendes, R., & Ferreira, E. S. (2011). Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. *Construction and Building Materials*, 25(2), 1049–1055. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.073>
- García, L. E., Juan, A., García, M., Universidad, C., & Valle, D. (2012). *ANÁLISIS TÉCNICO PARA LA ELABORACIÓN DE BLOQUES DE CONCRETO FABRICADOS CON AGREGADOS RECICLADOS*.

- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). *Production, use, and fate of all plastics ever made*. <http://advances.sciencemag.org/>
- González B., Héctor Álvaro, Salazar Narváez, Edwin Giovanny, Cabrera Castaño, & Christian Hemerson. (2008). *Cálculo del coeficiente de reducción de ruido (NRC), de materiales, utilizando una cámara de insonorización*.
- Greenpace Colombia, & Universidad de los Andes. (2019). *Informe Plásticos GREENPEACE*.
- Hidalgo-Salazar, M. A., Luiz Neves, F., & Baena, E. (2013). *Posibilidades de fabricación con el polietileno aluminio obtenido del reciclaje de envases multicapas Possibilities of fabrication of aluminium polyethylene obtained from multilayer package recycling*. www.tetrapak.com
- ICONTEC. (1991). *Norma Técnica NTC Colombiana 3205*.
- Jibrin Sule, Sule Emmanuel, Ismaila Joseph, Osagie Ibhadobe, Buba Y. Alfred, Farida Idris Waziri, & Emeson Sunny. (2017). *Use of Waste Plastics in Cement-Based Composite for Lightweight Concrete Production*. <http://www.ijretjournal.org>
- Koirala, S., Hirachan, B., Chhetri, S. G., & Gyawali, T. R. (2025). Utilizing residual waste particles from polyethylene terephthalate (PET) waste pellet production in cement mortar. *International Journal of Sustainable Engineering*, 18(1), 1–13. <https://doi.org/10.1080/19397038.2024.2446755>
- Kunthawatwong, R., Sylisomchanh, L., Pangdaeng, S., Wongsas, A., Sata, V., Sukontasukkul, P., & Chindaprasirt, P. (2022). Recycled Non-Biodegradable polyethylene terephthalate waste as fine aggregate in fly ash geopolymer and cement mortars. *Construction and Building Materials*, 328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127084>
- Marandi, N., & Shirzad, S. (2025). Sustainable cement and concrete technologies: a review of materials and processes for carbon reduction. In *Innovative Infrastructure Solutions* (Vol. 10, Issue 9). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s41062-025-02213-5>
- Mark Editor, J. E. (2007). *Physical Properties of Polymers Handbook Second Edition*.
- Mohammed, H., Giuntini, F., Sadique, M., Shaw, A., & Bras, A. (2022). Polymer modified concrete impact on the durability of infrastructure exposed to chloride environments. *Construction and Building Materials*, 317. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125771>
- Ohemeng, E. A., & Ekol, S. O. (2019). Strength prediction model for cement mortar made with waste LDPE plastic as fine aggregate. In *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* (Vol. 8, Issue 4, pp. 228–243). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/21650373.2019.1625826>

- Osswald, T. A. ., & Menges, Georg. (2012). *Material science of polymers for engineers*. Hanser Publishers.
- Oviedo Cogollo, A. R., & Vega Suárez, J. C. (2022). Manejo de residuos de construcción y demolición y economía circular: una revisión narrativa. *Lámpsakos*, 26. <https://doi.org/10.21501/21454086.4232>
- PlasticsEurope. (2020). *La Economía Circular de los Plásticos*.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente. (2022). *Sand and Sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis*. www.un.org/Depts/Cartographic/
- Ruiz-Herrero, J. L., Velasco Nieto, D., López-Gil, A., Arranz, A., Fernández, A., Lorenzana, A., Merino, S., De Saja, J. A., & Rodríguez-Pérez, M. Á. (2016). Mechanical and thermal performance of concrete and mortar cellular materials containing plastic waste. *Construction and Building Materials*, 104, 298–310. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.005>
- S, P., & P, R. (2022). Waste recycled plastic granules substitute for aggregate in concrete – Review. *Materials Today: Proceedings*, 65, 1441–1448. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.405>
- Saikia, N., & De Brito, J. (2013). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, 52, 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>
- Saikia, N., & De Brito, J. (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, 52, 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>
- Teknologi, J., Azree, M., & Mydin, O. (2016). *Assessment of Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity and Specific Heat Capacity of Lightweight Aggregate Foamed Concrete* (Vol. 78, Issue 5). www.jurnalteknologi.utm.my
- Vallejo Camila, & Villota Jorge. (2023). *DESARROLLO DE PANELES AISLANTES TÉRMICOS Y ACÚSTICOS A PARTIR DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN*.
- Záleská, M., Pavlíková, M., Pokorný, J., Jankovský, O., Pavlík, Z., & Černý, R. (2018). Structural, mechanical and hygrothermal properties of lightweight concrete based on the application of waste plastics. *Construction and Building Materials*, 180, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.250>