



# **Universidad Militar Nueva Granada**

**Programa de Ingeniería Civil**

**Facultad de Estudios a Distancia**

**“Determinación de las propiedades mecánicas de una unidad de mampostería en bloque, elaborado en mortero según la norma NTC 4024 combinado con PET triturado”**

**Informe Técnico de Trabajo de Grado**

**Presentado por:**

**María Isabel Giraldo Giraldo**

**Oscar Enrique Prieto Díaz**

**Asesor: Ing. Fabián Echeverri Quintero**

**BOGOTÁ, D.C.**

**2015**

## I. Agradecimientos

A Dios por ser mi guía y protector en cada etapa de mi vida y porque gracias a Él siempre me he sentido bendecida.

A todos y cada uno de los miembros de mi familia, en especial a mi madre, por ser ejemplo de perseverancia y mi fuente de inspiración. Y a mis hermanos porque siempre me han dado su apoyo incondicional.

A mi compañero, amigo y esposo José Alfredo Villadiego, por creer en mí, por darme su apoyo para alcanzar mi meta.

A los docentes y amigos con quienes se aprendió a crecer como profesionales y nos acompañaron en el desarrollo de las metas propuestas.

María Isabel Giraldo Giraldo

A mi esposa e hija, por el apoyo en el transcurso de la carrera, por su comprensión, ánimo y fortaleza para afrontar los retos que esto implica.

A mis amigos y compañeros que me han aportado conocimiento, experiencias, consejos y una valiosa amistad basada en el respeto.

Es satisfactorio culminar un proyecto con éxito e iniciar una nueva etapa en nuestras vidas, todo es posible en nombre de Dios que nos fortalece espiritualmente y nos guía por ruta del éxito.

Oscar Enrique Prieto Díaz

## II. Tabla de Contenido

I. Agradecimientos .....	i
II. Tabla de Contenido .....	iii
III. Lista de Tablas y Figuras .....	v
1 Introducción .....	1
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Justificación y planteamiento del problema.....	5
1.3 Objetivos.....	8
1.3.1 Objetivo general.....	8
1.3.2 Objetivos específicos .....	8
2 Marco Referencial.....	9
2.1 Introducción .....	9
2.2 Marco conceptual.....	9
2.2.1 PET .....	9
2.2.1.1. Características y propiedades del PET .....	11
2.2.1.2. Historia del PET.....	12
2.2.1.3. Reciclaje de PET .....	13
2.2.1.4. Usos del PET reciclado .....	17
2.2.2 Mampostería .....	18
2.2.2.1. Unidades de mampostería .....	18
2.2.2.2. Tipos de unidades de mampostería .....	20
2.2.2.3. Propiedades .....	22
2.3 Antecedentes de Investigación sobre el tema.....	26
2.4 Marco Normativo.....	28
3 Metodología .....	32
3.1 Introducción .....	32

---

3.2	Recopilación de la información .....	33
3.3	Selección de la Bloquera.....	33
3.4	Muestreo .....	34
3.5	Caracterización de los materiales.....	34
3.5.1	Caracterización de la arena .....	34
3.5.1.1	Ensayo granulométrico del agregado fino.....	35
3.5.1.2	Porcentaje de material que pasa el tamiz No 200.....	37
3.5.1.3	Peso unitario del agregado fino.....	39
3.5.1.4	Contenido de materia orgánica.....	41
3.5.1.5	Peso específico y absorción .....	42
3.5.2	Caracterización del PET.....	44
3.5.3	Cemento .....	47
3.6	Diseño de la mezcla .....	48
3.7	Elaboración del Bloque de Mampostería con PET .....	51
3.8	Pruebas de laboratorio.....	54
3.8.1	Ensayo de Compresión.....	54
3.8.2	Ensayo de Flexión.....	55
3.8.3	Módulo de Elasticidad .....	56
3.8.4	Ensayo de Absorción de agua .....	56
4	Presentación y Análisis de Resultados.....	58
4.1	Ensayo de Compresión .....	61
4.1.1	Interpretación de las tablas 4-1 y 4-2 .....	62
4.1.2	Análisis e Interpretación de los datos.....	64
4.2	Ensayo de Flexión.....	72
4.3	Módulo de Elasticidad .....	81
4.4	Ensayo de Absorción de agua .....	89
4.5	Evaluación económica .....	96
5	Conclusiones y recomendaciones .....	99
6	Referencias.....	102

### III. Lista de Tablas y Figuras

Tabla 2-1 Espesores mínimos de paredes en unidades de mampostería de perforación vertical (mm)	21
Tabla 2-2 Absorción de agua según su densidad	23
Tabla 2-3 Valor mínimo de la resistencia a la compresión Mpa (kfg/cm <sup>2</sup> ) de bloque de concreto y valor de la Absorción de agua según la densidad del concreto secado al horno	24
Tabla 2-4 Clasificación de mampostería estructural	30
Tabla 2-5 Tipo de unidades de mampostería	31
Tabla 3-1 Límite líquido de la arena	36
Tabla 3-2 Límite Plástico de la arena	36
Tabla 3-3 Granulometría	36
Tabla 3-4 Resultados módulo de finura de la arena	39
Tabla 3-5 Resultados Peso unitario suelto de la arena	40
Tabla 3-6 Resultado peso unitario compacto de la arena	40
Tabla 3-7 Resultados de materia orgánica presentes en la arena	42
Tabla 3-8 Datos de laboratorio	43
Tabla 3-9 Datos técnicos del PET. Industria del plástico. Plástico industrial. Richardson & Lokensgard	46
Tabla 3-10 Proporción de los materiales en volumen	49
Tabla 4-1 Bloques con PET de 2mm de tamaño.	61
Tabla 4-2 Bloques con PET de 5mm de tamaño	62
Tabla 4-3 Resultado de Cargas para bloque con PET de 2mm.	66
Tabla 4-4 Coeficiente de variación para distintos contenidos de PET	68
Tabla 4-5 Resultado de cargas para bloque con PET de 5mm	69
Tabla 4-6 Coeficiente de variación para distintos contenidos de PET	70
Tabla 4-7 Bloques con PET de 2mm de tamaño.	72
Tabla 4-8 Bloques con PET de 5mm de tamaño	72
Tabla 4-9 Ecuación del modelo de correlación $y=-0.7861x+0.3906$	76
Tabla 4-10 Ecuación del modelo de correlación $y=-0.4561x+0.3774$	79

Tabla 4-11 Densidad de bloques de concreto con presencia de PET 2mm.	83
Tabla 4-12 Densidad de bloques de concreto con presencia de PET 5mm	84
Tabla 4-13 Valores para el módulo de elasticidad en bloques de concreto de densidad normal con PET 2 mm.	87
Tabla 4-14 Valores para el módulo de elasticidad en bloques de concreto de densidad normal con PET 5 mm.	88
Tabla 4-15 Valores para el contenido de humedad de bloques de concreto con PET.	90
Tabla 4-16 Valores para el contenido de humedad en bloques de concreto con PET	92
Tabla 4-17 Valores para el contenido de absorción en bloques de concreto con PET.	95
Tabla 4-18 Costo de materiales para bloques con PET de 2mm de tamaño.	97
Tabla 4-19 Costo de materiales para bloques con PET de 5mm de tamaño.	97

## 1 Introducción

Diariamente la población mundial crece de manera acelerada y con ella la contaminación ambiental, es por esta razón que una de las finalidades de los futuros ingenieros civiles es la de buscar un equilibrio entre las necesidades de vivienda que tiene la población y el cuidado del medio ambiente.

El uso de materiales reciclables que a su vez se caracterizan por ser no biodegradables pueden establecerse como una posibilidad para disminuir el impacto ambiental que generan, pero también un impacto económico en cuanto al bajo costo del material, la fácil instalación, el poco peso y mayor vida útil.

Este trabajo conlleva a una investigación a cerca de las características del concreto combinado con PET reciclado como agregado grueso a diferentes tamaños de granulometría. Se trata de crear un nuevo elemento constructivo que sea eficaz en la industria de la construcción.

Para el proceso experimental es necesario llevar a cabo la caracterización de cada uno de los materiales a emplear, se diseñan las mezclas y se realizan pruebas mecánicas necesarias para que cumplan con los estándares exigidos por la normatividad colombiana.

De esta manera se elabora un material ecológico, con buenas propiedades mecánicas que esté en concordancia con el quehacer del ingeniero y lograr una disposición adecuada de los plásticos producidos a nivel mundial, colaborando con el cuidado del medio ambiente, al desarrollar una tecnología sustentable y limpia.



## 1.1 Antecedentes

El empleo de unidades de mampostería de arcilla se remonta a muchos años atrás y actualmente sigue manteniendo su forma ortoédrica cuyas dimensiones facilitan su uso. Los agricultores del Neolítico precerámico fueron los primeros en usarlos, aproximadamente 9500 A.C. Luego los Sumerios y Babilónicos los utilizaron en sus construcciones, donde los secaban al sol y también los cocinaban para aumentar su resistencia. En ocasiones se recubrían con esmaltes para aumentar aún más su durabilidad al intemperismo (Wikipedia, s.f., Historia del ladrillo). Los cambios que muestra este producto de construcción a través de la historia no son muchos, algunos pequeños cambios en sus dimensiones y propiedades de cocción son los más representativos, igualmente la aparición del concreto y el mortero generó la aparición de ladrillos o bloques a base de cemento. En la actualidad, el empleo de bloques de concreto en las obras de ingeniería en países desarrollados ha alcanzado una importante expansión tanto en calidad como en la variedad de usos que ofrece, se usan en muros de viviendas, algunas alcantarillas, adoquines y se usan tanto macizos como con perforaciones horizontales y verticales.

A nivel de Latino América, República Dominicana es quizás el mayor productor de bloques de concreto, esto, debido a la alta demanda de la industria de la construcción (Revista ARQHYS.com, diciembre de 2016, Bloques de Hormigón). La amplia utilización del bloque de concreto se debe principalmente a las ventajas que presentan con respecto a otros materiales de construcción, entre los que se puede mencionar la facilidad de su uso, tanto en soluciones simples como estructurales, la capacidad de conferir propiedades de textura superficial sin necesidad de terminaciones o revestimientos adicionales, con el consecuente beneficio económico y arquitectónico, además del apropiado aislamiento térmico y acústico (Ing. Timoteo Gordillo, s.f., Bloques de Hormigón).

Aunque son inmensas las posibilidades y beneficios que ofrece la unidad de mampostería convencional es de rescatar las desventajas que presenta el bloque de concreto, entre los que puede mencionarse el peso y costo. A pesar de ser competitivo por precio, relativamente es costoso, debido a que su materia prima

principal es el cemento y este es más costoso en todos los países en comparación de la arcilla. Otra desventaja es su peso, lo que genera que las estructuras sean más pesadas y se aumente la fuerza sísmica, debido a que este depende directamente del peso de las estructuras.

Las investigaciones realizadas a este tipo de elemento son muy pocas, la mayoría se basan en darle texturas, colores y otras características arquitectónicas.

Actualmente ha aparecido un nuevo componente en la elaboración de ladrillos, reemplazando el material pétreo grueso por Tereftalato de Polietileno, comúnmente llamado PET, siendo pioneros en Latinoamérica en esta clase de proyecto la Universidad de Córdoba en Argentina, quienes realizaron los estudios mecánicos para este tipo de ladrillo (Revista La Nación Argentina, 2006, Ya se pueden construir casas con ladrillos de plástico y cemento). Los investigadores del CIPRODE (Centro de Investigación para la Producción y Desarrollo), en el Perú, afirman que los materiales plásticos reciclables, reemplazan adecuadamente los agregados pétreos de concretos comunes (Yosselin Sandoval, 2014, Ladriplast).

A nivel de Colombia se han hecho algunas prácticas relacionadas, pero aún sin patentar, ni sustentar con ensayos de laboratorio, desconociéndose el impacto favorable que este puede generar tanto en el ambiente como en el costo, la resistencia y el peso.

Con este trabajo se da soporte científico a las propiedades mecánicas del ladrillo, estandarizando las cantidades exactas de sus agregados con el fin de proponer como una alternativa económica, confiable y amable con el medio ambiente para la construcción de viviendas en general. Todo lo anterior se comprueba mediante pruebas de laboratorio que arrojan resultados factibles y precisos.

En cuanto al reciclaje y acopio del PET, según la revista virtual *Tecnología del Plástico*, en su artículo “*El reciclaje de PET está en su mejor momento (agosto del 2011)*”, se afirma que la recolección y la recuperación del material usado es el principal inconveniente que encuentran las empresas interesadas en reciclar PET. Estas labores son la piedra fundamental para garantizar un abasto permanente y confiable, que a su vez permita el desarrollo de una industria recicladora. A pesar de que se exalta la reciclabilidad

del PET como uno de sus más preciados beneficios, para la mayoría de los mercados la cantidad de material que va a parar a un relleno sanitario o vertedero aún supera a la cantidad que se recicla.

En el artículo previamente citado también describe a Japón como el país más avanzado en este campo, registró una tasa de reciclaje de botellas de PET (volumen total de recolección/volumen de botellas vendidas) de 77,9 % en 2009, según datos del Consejo de Reciclaje de Botellas de PET de ese país. Por su parte, Europa tiene cifras consolidadas de 48,3%, de acuerdo con la Asociación Europea de Reciclaje de Contenedores de PET (Petcore), y Estados Unidos de 28%, según la Asociación de Resinas de PET (Petra). Brasil es el líder con una tasa de 55,6%, seguido por Argentina con 34%, según reportes de la Asociación Brasileña de la Industria del PET (Abipet).

El tema del acopio es crítico para la industria de reciclaje en América Latina, donde no hay una cultura de separación en la fuente. Aun así, las cifras de recuperación muestran un gran potencial. Brasil es uno de los mayores recicladores de PET en el mundo y se precia de consumir internamente todo el material que recupera, según el censo de reciclaje 2010, publicado por Abipet.

México ha creado una cadena de valor sólida e interesante como estudio de caso (ver más adelante) y en otros países hay iniciativas privadas que se están ocupando del tema”.(Ortega Leyva, 2011, pág. 1)

Por lo anterior, puede afirmarse que Colombia basada en lo que han empezado otros países, sería beneficiada enormemente tanto a nivel ambiental como a nivel económico, puesto que al normalizar su uso y dar cumplimiento a las pruebas de laboratorio pertinentes en pocos años las cantidades de reciclaje y reutilización de este material basado en la capacidad de la empresa Enka de Colombia S.A. la mayor empresa recicladora de PET en Colombia serian de 1 millón de botellas/día. Así, no solo se contribuye con el medio ambiente, además se estaría generando iniciativas comerciales de negocio que podría ser muy rentables. Esto debido a que parte de la materia prima es gratuita o muy económica (\$800/Kg) y no superaría por muchos gastos de recolección (\$170.000/Ton), separación (\$7'000.000/mes) y disposición final (\$3'000.000/mes) para empezar la elaboración de los ladrillos (Sebastián Pérez Arbeláez, Estudio de

Prefactibilidad para un negocio de recolección de botellas de PET en la ciudad de Medellín, mediante maquinas receptoras, 2015).

## 1.2 Justificación y planteamiento del problema

El reciclaje de PET se está proyectando como parte fundamental de la tendencia ambiental que se vive actualmente convirtiéndose en una de las mayores oportunidades de obtener materia prima que sirva como insumo en la creación de nuevos elementos de construcción de obras civiles. A pesar de la alta reciclabilidad del PET, para la mayoría de los mercados la cantidad de material que va a parar a un relleno sanitario aún supera a la cantidad que se recicla y esto constituye actualmente una problemática ambiental. Al emplear dicho material como un elemento más en la fabricación del ladrillo, se obtienen resultados positivos desde el punto de vista ambiental y financiero, pues disminuiría la explotación de agregados pétreos usados en industria de la construcción, reduciría la explotación de derivados del petróleo y disminuiría la cantidad de residuos sólidos a enterrar, aumentando la vida útil de los rellenos y botaderos a cielo abierto.

De acuerdo a los datos suministrados por el fabricante de bloques en concreto, para la elaboración de una unidad de mampostería se requiere aproximadamente 1Kg de PET, teniendo en cuenta que el peso de una botella de 600ml es de 0.024Kg, se puede afirmar que aproximadamente en una relación de 1Kg/0.024Kg necesitamos 42botellas (Sebastián Pérez Arbeláez, Estudio de Prefactibilidad para un negocio de recolección de botellas de PET en la ciudad de Medellín, mediante maquinas receptoras, 2015). Según cifras del ministerio de ambiente Colombia produce 27.000 toneladas de residuos diarios de los cuales solo el 20% es reciclado, 5.400 Toneladas. Si se reciclara todo el contenido de botellas se podrían producir sin problemas cerca de 1'350.000 ladrillos al día. Si en promedio una vivienda de interés social

requiere 2.000 ladrillos significa que existirían ladrillos para hacer más de 650 viviendas al día. Si se llevara a cabo esta iniciativa y se tuviera en cuenta el precio actual de los ladrillos que es aproximadamente a \$1.000 la unidad, los ladrillos para una vivienda valdrían \$2'000.000, si se utiliza en la dosificación promedio de ladrillos PET 60/40 significa que los precios en producción de cada unidad se reducirían cerca de un 30%, lo que significa comprar 2000 ladrillos no tendrán un valor de \$2'000.000 sino \$1'400.000 que fácilmente es una opción factible de ser utilizada.

Actualmente se vienen empleando ladrillos similares que a diferencia de estos reemplazan los agregados por PET, tal es el caso de la propuesta hecha por CEVE (Centro Experimental de la Vivienda Económica) y CIPRODE. En Colombia el PET se somete al calor para reducirlo a un ladrillo compacto sin ser combinado con otro material, o en su defecto, simplemente se rellena con empaques o tierra y posteriormente se utiliza como una unidad de mampostería cualquiera sin que la botella sufra cambios físicos.

El ritmo acelerado del deterioro ambiental y el agotamiento paulatino de recursos renovables han llevado a investigadores y pequeños empresarios a implementar nuevos materiales de construcción hechos a base de plásticos reciclados. Los mismos tienen dos aspectos importantes que ofrecer: cuidar el planeta reutilizando los residuos plásticos; aprovechar el beneficio económico puesto que son más baratos. Dichas ventajas no son las únicas: son más livianos, ofrecen mejor conductividad térmica (aislamiento de temperatura) y resistencia mecánica.

En las investigaciones que se han realizado para descubrir nuevos materiales para la construcción usando plásticos en su composición, se encontraron paneles, placas y ladrillos, sin embargo aunque este tipo de elementos constructivos deben estar regidos bajo los requisitos que estipulan las normas técnicas colombianas para la industria de la construcción no se encuentra norma alguna que corresponda o haga referencia al empleo de plásticos para su elaboración en relación a los componentes de uso convencional mucho menos existe una estandarización para las cantidades que debe contener.

Bajo este contexto, se plantea el siguiente problema:

Buscar una nueva alternativa para la elaboración de una unidad de mampostería en bloque con mortero y PET, que cumpla con los requisitos de resistencia y economía, para ser utilizados en la construcción de obras civiles.

De acuerdo con esta situación, el interrogante principal del proyecto propuesto se define como:

La unidad de mampostería elaborada en mortero y PET, ¿cumple con los requisitos de resistencia y economía para ser utilizados en la construcción de obras civiles?

Se propone un material innovador en el mercado de la construcción que tenga un precio accesible, económico y que responda a los ensayos mecánicos, logrando la resistencia satisfactoria.

El proyecto propone determinar mecánicamente un elemento constructivo sustituto para la construcción de muros en ladrillo de mampostería no estructural, mediante el uso de una mezcla de mortero (comúnmente usado para fabricar ladrillos para paredes) y de PET triturado, todo esto con el fin de disminuir los costos de fabricación del ladrillo en ese porcentaje, reducir los costos de la obra y solucionar a tiempo una problemática ambiental relacionada con el exceso de residuos de botella de PET. El ladrillo que se propone serviría como opción de mampostería para las obras de interés social si cumpliera con las normas establecidas para la resistencia mecánica a nivel ingenieril.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Determinar las propiedades mecánicas de una unidad de mampostería en bloque elaborado en mortero combinado con PET previamente triturado a un tamaño de tamiz 2 mm y 5mm en las proporciones 60%/40%, 70%/30% y 80%/20% de mortero y PET respectivamente.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Investigar geográficamente las cantidades de PET que se producen en Colombia.
- Evaluar el costo de recolección, transporte, molienda y disposición final del PET.
- Evaluar en el laboratorio las propiedades mecánicas de los especímenes desarrollados.
- Determinar el costo de producción del ladrillo con las propiedades más favorables.

## **2 Marco Referencial**

### **2.1 Introducción**

El presente capítulo muestra algunos conceptos y características generales de cada uno de los materiales empleados en la investigación de nuevos mampuestos no estructurales elaborados a base de PET y mortero realizadas en el mundo.

### **2.2 Marco conceptual**

#### **2.2.1 PET**

El Polietileno Tereftalato (PET) cuya fórmula química es  $[-CO-C_6H_4-CO-O-CH_2-CH_2-O-]$  es el resultado de un proceso de polimerización de ácido Tereftálico y Etilenglicol, el cual, también puede obtenerse al reemplazar el ácido Tereftálico por el compuesto Dimetil tereftalato; compuestos que son llevados a temperatura y presión elevada con el fin de obtener dicha resina en estado amorfo, para ser transformada mediante procesos de extrusión, inyección, inyección soplado y termoformado. Posteriormente es cristalizado y polimerizado con el objetivo de incrementar su peso molecular y su viscosidad. En otras palabras, el PET, se obtiene de la reacción directa de (Esterificación) del ácido Tereftálico con el Etilenglicol formando un “monómero” el cual es sometido a una policondensación para



lograr un polímero de cadena larga que contiene cerca de 100 unidades repetidas. Por lo tanto, el resultado final de un polímero depende de la calidad de su monómero, en este caso el Etilenglicol no genera ninguna dificultad mientras que el ácido Tereftálico al ser un sólido no favorece el proceso. (Aprepet, 2006).

Es un material polar, con rigidez, y resistencia a la abrasión. Su proceso de transformación es complicado, debido a la cantidad de agua que puede absorber. Adicionalmente, en el proceso de hidrólisis se puede presentar destrucción, descomposición o alteración de la sustancia química. Se pueden distinguir tres tipos fundamentales de PET, como lo son el grado textil, el grado botella y el grado film.

El grado textil fue el primero en ser utilizado por la industria reemplazando las fibras de algodón y lino. En el mercado actual se conoce como polyester al proceso textil del PET. Dentro de las características de este proceso se encuentran su resistencia a la deformación, su estabilidad dimensional y el fácil cuidado de la prenda, pues por su característica la prenda no necesita planchado. Sin embargo, este proceso presenta algunas limitaciones que hacen que éste sea más complejo, entre ellas se encuentran la formación de pillingo bolitas en la prenda, la dificultad para ser tinturado y la acumulación de electricidad estática

En cuanto al grado botella, se inicia su proceso de industrialización en Europa en el año 1974 y empieza a comercializarse en Estados Unidos. El éxito de este proceso industrial está en el uso del material PET, en el envasado de aguas minerales. Posteriormente, es usado en el empaque de productos farmacéuticos y alimenticios entre los que se encuentran las salsas, mermeladas entre otros. Por último, el PET grado film es utilizado en la producción de películas, audios y rayos x.

### **2.2.1.1. Características y propiedades del PET**

El PET ha logrado posicionarse como uno de los compuestos más utilizados en la industria mundial, debido a sus características y propiedades que lo hacen llamativo no solo en el comercio sino también para la ingeniería. Entre las propiedades principales se encuentra la cristalinidad y transparencia dadas por el ácido Tereftálico. Adicionalmente admite cargas de colorantes, tiene alta resistencia al desgaste, posee termoformabilidad, tiene buena resistencia química, es totalmente reciclable, posee alta rigidez y dureza, propiedades térmicas y es factible para el envasado de alimentos y farmacéuticos.

En cuanto a las propiedades físicas y su procesamiento, el PET presenta una flexibilidad molecular que es reflejada en su temperatura de transición vítrea la cual se explica básicamente como una temperatura intermedia entre el estado rígido y fundido, entiendo que este solo aplica para materiales vítreos y para el presente caso se encuentra en torno a los 70 y 80°C. Lo que permite que la cristalización sea controlada por las condiciones del enfriamiento. Además, por la presencia de anillos aromáticos en su cadena, el PET presenta una estructura molecular estructural que facilita su proceso de cristalización. Pese, a las propiedades mencionadas, este material tiende a perder resistencia física, razón por la cual el uso es limitado o reemplazado por otras opciones de procesamiento. (Aprepet, 2006).

Por otro lado, dentro de las características del PET se encuentra la biorientación, que es el proceso en el cual se produce la modificación de la estructura molecular del PVC en dos direcciones perpendiculares entre ellas en sentido axial y radial, pasando de ser una estructura amorfa a un laminar en el cual las moléculas conservan su entrelazamiento mientras son realineadas, lo que facilita las propiedades mecánicas y de barreras con optimización de espesores. Gracias a la cristalización, entendida como el proceso por el cual se genera la formación de un sólido a partir de un líquido o un gas, se logra la resistencia térmica para utilizar bandejas termoformadas en hornos a altas temperaturas. Por último, se encuentra la esterilización química realizada con óxido de etileno y radiación gamma el cual es un método

que trabaja en frío a temperaturas que no superan los 60°C con el objetivo de no ser perjudicado por el calor y disminuir su vida útil consiguiendo la resistencia óptima del PET (Reyes, 2009).

Las características eléctricas, dieléctricas y químicas del PET son la resistencia a los agentes químicos, la baja absorción de humedad que lo hace adecuado para la fabricación de fibras, estabilidad a la intemperie, la resistencia a aceites, grasas que se encuentran presentes ya sea en alimentos, sustancias diluidas o ácidos minerales y la baja resistencia a cetonas de bajo peso molecular, solventes halogenados y bases.

### **2.2.1.2. Historia del PET**

Surge durante la segunda guerra mundial el descubrimiento del Polietileno Tereftalato patentado por John Rex Windfield y James Tennant Dickinson quienes investigaron los poliésteres termoplásticos durante el periodo comprendido entre los periodos de 1939 y 1941. El objetivo de la investigación, nace por la necesidad de buscar sustitutos para el algodón proveniente de Egipto. Años más tarde, el PET empieza a utilizarse industrialmente en la fibra y en el uso textil, tomando mayor fortaleza hacia 1977 cuando se crean las primeras botellas causando gran revolución en el mercado mundial, debido a la utilidad dada en comestibles, bebidas refrescantes, detergentes, aguas minerales entre otros. (Reyes 2009).

Una de las posibles causas por las cuales el PET ha logrado alcanzar los grandes mercados de la industria global es gracias a su baja densidad de 1.455gr/cm<sup>3</sup>, el cual es menor a su contenido, lo que representa ahorro no solo en el transporte de mercadería sino también en el consumo de combustible y desgaste del motor. Además de la baja temperatura que requiere para ser transformados en nuevos productos reciclables que no solo están aportando al bienestar social, también contribuyen al cuidado del medio ambiente cuando dicho material es reciclado.

En consecuencia, la revolución tecnológica del PET, ha permitido la evolución de materiales constituyentes del envase, desarrollo de la industria, sustitución de otros productos, reducción del costo

económico y el impacto medioambiental dado gracias al proceso de reciclaje que viene desarrollando en diferentes países de América, Europa y Asia.

En cuanto a la producción de la fibra polyester, comenzó en el año 1955, y hacia 1976 empieza a ser utilizada en la industria del envase usado en bebidas. Hacia 1980, empieza su proceso de comercialización en España, años después en México, causando gran revolución en el mercado y convirtiéndose en el producto de envasado ideal en la revolución moderna, tomando fuerza hacia los años 90, continuando desde entonces hasta la actualidad con su mejora y desarrollo industrial. (Aprepet, 2006).

Debido a su alta cristalinidad y a la naturaleza aromática del Polietileno Tereftalato que hacen que el material sea considerado no biodegradable y por lo tanto desfavorable para el medio ambiente (Crawford & Rusell, 2013, Plastic degradation and its environment all implications with special reference). A partir de ahí nace la necesidad de recurrir a otras estrategias que contribuyan al cuidado del planeta, como lo es el proceso de reciclado. En este proceso los productos realizados con material PET son reprocesados con el fin de acondicionarlos para la generación de una nueva materia prima, como lo son las láminas para la fabricación de blíster y cajas, los flejes para productos voluminosos y los envases. Dicho proceso puede darse como una manera de aprovechar los envases tan pronto sean desechados (Reyes, 2009, Estudio de factibilidad para la instalación de una planta recicladora de envases de PET).

### **2.2.1.3. Reciclaje de PET**

Dentro de las distintas formas del reciclado de los envases PET, después de terminada su vida útil, se encuentran tres procesos básicos de reciclaje del PET (Reciclado químico de PET, obtención de Dibenzil Tereftalato, 2014, Ferias de la ciencia Universidad Autónoma de México) los cuales son: El reciclaje mecánico que consiste en la recolección del material plástico los cuales son escogidos y limpiados

(etiquetas, papeles, residuos de material) para iniciar su proceso de trituración en una maquina extrusora-granceadora. De acuerdo a la contaminación del plástico el proceso puede variar. Luego, el producto es lavado y separado de aquellas sustancias que son consideradas contaminantes, si es necesario, se repite el proceso. Seguidamente, el material es llevado a la centrifuga en donde es lavado y secado y guardado en un silo intermedio con el objetivo de homogeneizarlo. Después de tener el producto lavado y triturado es llevado al proceso de granceado, allí la granza, es procesada de acuerdo al producto final que se quiere obtener.

Igualmente, el reciclado químico ha sido otra estrategia ambiental, usada por la industria y consiste en separar las materias básicas del PET entre las que se encuentran los compuestos básicos de la resina y la síntesis de ahorro de gas y petróleo. Dentro del reciclado químico existen otros procesos entre los que se encuentran: La pirolisis, relacionada con el craqueo de las moléculas dadas por el calentamiento en el vacío, en el caso del PET la pirolisis produce gas carbónico activado; La hidrogenación, entendida esta como el proceso en el que las cadenas poliméricas son rotas y convertidas en petróleo sintético. La gasificación, en el que los gases son calentados con aire o con oxígeno; La Chemolysis, es la aplicación de procesos solvolíticos para transformar los materiales reciclados en nuevos plásticos; y la metanólisis, es el proceso en el que se da uso del Etanol en el PET.

Por último, se encuentra el reciclaje energético en el cual los átomos de carbono, oxígeno e hidrógeno al ser quemados producen dióxido de carbono y agua con desprendimiento de energía. En este proceso se evidencian tres tipos de plantas que recuperan energía: la primera de ella es la planta de combustión que representan el 8% de los desechos y produce el 30% de la energía liberada, en segunda instancia se encuentran los de combustión empleados por el PET para la producción de combustible y para finalizar se encuentran las que se usan en el PET en los combustibles fósil. Por este motivo el reciclaje se considera una solución a los problemas ambientales que se dan gracias a la cantidad de desechos que diariamente se generan a nivel mundial.

Europa y Asia son los continentes con mayor índice de tasa de reciclaje del PET, superando el 30%, totalmente opuesto al porcentaje reflejado en América Latina, especialmente en Colombia en donde este proceso no alcanza una tasa alta, convirtiéndose de esta manera en uno de los países con menor índice de reciclaje PET dejando de lado la importancia que requiere este proceso en el medio ambiente.

Es de resaltar, que el Polietileno de Tereftalato puede tardar muchos años en degradarse, por el contrario, al realizarse el proceso de reciclaje puede producirse otras materias primas que benefician no solo los procesos industriales como es el campo textil, también la ingeniería, los envases, aceites, gaseosas, agroquímicos y el medio ambiente. Sin embargo, en Colombia actualmente existe iniciativa por parte de la promotora de desarrollo (Codesarrollo) en la ejecución de procesos de reciclaje del PET en el país.

El proceso de reciclaje del PET, se realiza a través de varias etapas las cuales se pueden alternar dependiendo de la planta y de las necesidades de la misma. En primer lugar, se encuentra el proceso de separación que tiene como objetivo conseguir un producto limpio a través de la eliminación de todo tipo de bacterias e impurezas que contenga el material. Esta selección es realizada de forma manual o automática clasificando los materiales por color, plástico, metálico. Este sistema de separación se puede realizar en dos sistemas distintos como lo son los separadores colorimétricos y los triboeléctricos, Los resultados dependen de las características que tengan cada material que se va a separar. (Grado de impureza, humedad entre otros). El siguiente proceso está relacionado con el triturado en donde los envases son desmenuzados a través de los molinos de cuchillas. El tamaño y forma de la trituración pueden cambiar, lo ideal es que el tamaño de las hojuelas no supere los 10 mm y esté libre de polvo. Seguidamente, es llevado al proceso de lavado el cual puede realizarse al comienzo con el envase o después sobre la trituración, a temperaturas frías, ambiente, media, caliente; esta última superando los 70°C. (Aprepet, 2006).

El objetivo del lavado es eliminar los residuos de cola, tierra y arena, papeles que se encuentran en la superficie de la escama. El proceso de lavado usado es el método de fricción, centrifugación y ciclón y

puede variar el tiempo de secado dependiendo de la presencia de vacío en el producto. Por último, se encuentra en proceso de extrusión o granceado en el que la trituración realizada, ya limpia y seca es sometida a temperatura y presión para obtener el producto final, pues es allí en donde algunas escamas son eliminadas. Los anteriores procesos de reciclaje son de gran importancia pues eliminan los contaminantes, etiquetas, adhesivos y otros polímeros que no permiten la pureza del producto.

Pero ¿cómo identificar un producto que esté realizado con resina PET? Bien, para hacerlo es necesario buscar en el fondo del producto un símbolo de color verde, con tres flechas en forma de triángulo las cuales giran en sentido de las manecillas del reloj y que lleva en el centro el número uno (1) con las iniciales PET O PETE. (SMA, 2002). Otra forma de reconocer el símbolo en un producto PET es buscando el punto opaco en el centro del fondo.

En el caso de las botellas PET, estas pueden clasificarse en Retornables la cuales después de su primer uso pueden reutilizarse a través de un proceso de limpieza y esterilización hasta que el producto pierda algunas propiedades (25 veces). Las no retornables son aquellas que al consumir el producto que contienen se desechan. Uno de los países con mayor número de productos envasados en botellas no reciclables es México. (SMA, 2002)

Para Jorge Triviño, director de ecología y compromiso empresarial (ECOCE, 2006) “El incremento de unidades, recicladas es debido al aumento de la conciencia ambiental en el conjunto de la población y puesto de manifiesto en el número creciente de programas de recolección diferenciada en municipios. Estas cifras demuestran como una modesta acción de cada familia o individuo, al estar escrita en un programa municipal, se transforma en beneficios de indudable importancia para el conjunto de la sociedad.” De lo que puede inferirse que el proceso de reciclaje en los diferentes países no solo depende de cada una de las empresas involucradas en este proceso, sino de los individuos que forman parte de la sociedad, pues es desde allí, como se inicia el proceso de reciclaje cuando cada persona o familia clasifica los desechos.

#### **2.2.1.4. Usos del PET reciclado**

Hay que mencionar, además, que el uso del PET reciclado no solo se está dando en las botellas, la industria farmacéutica y en la industria textil. Desde hace unos años, se ha venido haciendo eco a la idea de reutilizar el plástico PET no solo en los procesos mencionados anteriormente; sino en la construcción de viviendas usando el eco ladrillo. Hacia el 2011, Micheline Nayelli Gama Cadena, estudiante de maestría en arquitectura, propone usar estas botellas para construir viviendas de interés social en lugar de acumularlos por cantidades en distintos lugares de las ciudades. La estudiante afirma “Con dos mil envases reciclados de agua y refresco se pueden construir los muros de una casa”. Además, manifestó que este proyecto ya lo han realizado algunos países como Guatemala, México, Bolivia, Colombia y Estado Unidos en pequeñas comunidades.

De acuerdo a lo manifestado por la persona mencionada, destac que la vida útil de una botella PET es de un día, pero que el tiempo que tarda en degradarse es de 300 años en promedio, por ello la reutilización del material es una solución viable para incluir este material en la edificación. También porque es una solución a la problemática presentada con los desechos.

En Colombia, ya existen este tipo de construcciones fabricadas con los eco ladrillos en Cazucá, cerca de Bogotá, la primera construcción fue realizada por la ONG, un techo para mi país y consiste en un salón comunal y fue construido completamente con eco ladrillos y con la ayuda de la comunidad del barrio y voluntario. (Quintero, Daniel 2014)

(Salas David, 2012) afirma “En principio, el eco ladrillo tiene el potencial de ser usado con la misma efectividad de un ladrillo normal, pero al igual el ladrillo, necesita de un pórtico compuesto de la red de columna y varilla que le de soporte para que sea una vivienda viable de cualquier tipo”, David Salas, ingeniero de la firma Construcciones el Bosque S.A., ganadora del premio nacional de ingeniería 2012, otorgado por la Asociación Colombiana de Ingenieros.



Finalmente, el PET, es un material plástico en el que su proceso de reciclaje disminuye los problemas ambientales por los que está atravesando el planeta actualmente. Es por ello, que con el presente proyecto de investigación se busca aprovechar al máximo este material reciclado para la elaboración de eco ladrillos y por ende la construcción de diferentes tipos de viviendas.

## **2.2.2 Mampostería**

Las unidades de mampostería, son elementos fabricados, que de acuerdo a su composición se pueden encontrar de cerámica (arcilla cocida), silico calcáreas o concreto, por sus características mecánicas en cuanto a resistencia, rigidez y durabilidad permiten que estas, sean empleadas en la elaboración de todo tipo de estructuras de ingeniería civil; las unidades de mampostería se pueden encontrar con perforación vertical, con perforación horizontal o simplemente macizas, su uso se debe a la configuración del muro y a las características de sismicidad de la zona donde se pretenda elaborar la estructura.

### **2.2.2.1. Unidades de mampostería**

Las unidades de mampostería, siguiendo las especificaciones de la norma colombiana de diseño sísmico resistente se encuentran caracterizadas en : unidades típicas y las unidades especiales, las unidades especiales son unidades con una configuración prismática, conformada especialmente por seis lados planos los cuales son empleados para la colocación de la pega, en la elaboración de muros y para la colocación del acero de refuerzo en caso donde se emplee la mampostería estructural, estas unidades pueden ser macizas, con perforación vertical o unidades típicas con perforación horizontal.

Las unidades de mampostería consideradas como especiales son empleadas para la elaboración de viga, dinteles y columnas, generalmente este tipo de unidades son empleadas como mecanismo de resistencia al

corte, existen dos tipos de unidades de perforación vertical especiales y unidades especiales. (Takeuchi, 2007).

Las unidades de mampostería generalmente se encuentran elaboradas en tres tipos de materiales que se mencionaron anteriormente, en arcilla, en donde esta debe contar con buenas características de plasticidad, resistencia a la tensión, presentar una baja retracción, características que permitirán facilitar el secado y prensado luego de ser sometidas a altas temperaturas.

Unidades de concreto, este tipo de unidades se elaboran luego de haber realizado una adecuada dosificación de agua, agregados y material cementante, su proceso de fabricación se basa en la elaboración de una mezcla consistente con las características especificadas de acuerdo a las necesidades de resistencia que se requieren, la mezcla se introduce en un molde a través de un proceso de compresión, que luego será retirado para su posterior proceso de curado. Las unidades de mampostería de concreto pueden ser de peso liviano, peso mediano y peso normal. (Takeuchi, 2007).

Para la producción de las unidades de concreto, es importante contar con una buena calidad de los materiales, también con equipos de producción adecuados, que permitan generar unidades de mampostería con calidades, que se encuentren dentro de lo especificado por la norma de construcción colombiana.

El proceso de fabricación de las unidades de concreto comprende los siguientes pasos:

Realizar una buena clasificación de los agregados, enmarcada por una buena granulometría, con la finalidad de obtener espesores de tabiques adecuados y lograr resistencias equivalentes. La calidad del material cementicio, así mismo como la de los aditivos empleados en la elaboración de las unidades de concreto.

Un buen diseño de mezcla es una de las características más importantes, puesto que, con base en esta, se definen muchas propiedades de las unidades de concreto, como su resistencia a la compresión, su capacidad de absorción de agua, resistencia a la abrasión etc.

Las unidades sílico calcáreas, son unidades compuestas por la combinación de arena silícea y cal hidratada, el cual a través de un proceso de compactación por compresión se moldea, seguidamente su proceso de curado se realiza con la utilización de vapor a presión.

Una vez se han determinado la calidad y diseño de mezcla, es importante incorporar los aditivos en forma líquida, si se emplea algún tipo de pigmentación para darle tonalidad a las unidades, se debe incorporar simultáneamente con el aditivo a usar.

La mezcla se debe conducir a una maquina vibro compresora, que moldea las unidades con vibración y compresión, usando moldes precisos, las unidades salen de la maquina sobre placas de acero, que posteriormente serán llevada a una cámara de curado donde son colocadas sobre estanterías y se les aplica la humedad por micro aspersión de agua durante 24 horas. (Concretodo, 2013)

#### **2.2.2.2. Tipos de unidades de mampostería**

- Unidades de perforación vertical

Son unidades que se pueden emplear en zonas de distinta caracterización de sismicidad y se emplean en la elaboración de todo tipo de estructuras, las unidades de mampostería de perforación vertical deben cumplir con los requisitos dimensionales establecidos por la NSR-10, la perforación presente en la unidad de mampostería se usa para la localización del acero de refuerzo vertical.

**Tabla 2-1 Espesores mínimos de paredes en unidades de mampostería de perforación vertical (mm)  
(Asociación Colombiana de ingeniería Sísmica, 2010)**

Espesor externo	Espesor mínimo de paredes exteriores		Espesor mínimo de tabiques transversales
	Sin perforaciones verticales secundarias	Con perforaciones verticales secundarias	Sin perforaciones verticales secundarias
80 <sup>(1)</sup>	20	30	20
100	20	30	20
120	22	32	20
150	25	35	25
200	30	40	25
250	35	45	30
300	40	50	30

Nota<sup>(1)</sup> La unidad de 80 mm de espesor externo nominal sólo se permite en muros no estructurales y en las paredes laterales de mampostería de cavidad

- Unidades de perforación horizontal

Este tipo de unidades, tienen un uso más limitado, su uso se debe realizar teniendo en cuenta las características sísmicas de la zona, sin embargo, se pueden emplear en la elaboración de muros confinados o muros reforzados externamente.

- Unidades macizas.

Las unidades macizas generalmente se emplean en la elaboración de muros confinados, sin embargo, su uso se presenta solo en estructuras en donde el grado de disipación es bajo o en la elaboración de mampostería simple o no reforzada. (asociacion colombiana de ingenieria sismica , 2010).

### 2.2.2.3. Propiedades

- Dimensiones, Densidad y Volumen.

Es importante determinar, las propiedades de las unidades de concreto, con la finalidad de conocer adecuadamente la densidad de la unidad de mampostería que se esté elaborando y si cumple con los requerimientos para lo cual esta va a ser empleada, en cuanto a dimensiones de los tabiques y tamaño de las celdas, en caso de ser una unidad destinada para la mampostería estructural.

El ensayo para determinar esta propiedad se elabora con la inmersión en agua y su posterior cálculo de la masa sumergida, o simplemente encontrando el volumen de vacíos para el caso de ser unidades con perforación vertical, si las unidades a evaluar son macizas, se calcula simplemente con las dimensiones dadas por el fabricante.

$$\text{Volumen (m}^3\text{)} = \frac{\text{m s}^{-3} \text{ (k)}^{-1} \text{m}^{-3} \text{ s}^3 \text{ (k)}}{1 \left(\frac{\text{k}}{\text{m}^3}\right)} \quad (1)$$

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa s}}{\text{Volumen}}$$

$$\text{Densidad} \left(\frac{\text{k}}{\text{m}^3}\right) = \frac{\text{m s}^{-3} \text{ (k)}^{-1} \text{m}^{-3} \text{ s}^3 \text{ (k)}}{\text{m s}^{-3} \text{ (k)}^{-1} \text{m}^{-3} \text{ s}^3 \text{ (k)}} \quad (2)$$

- Absorción en agua.

Es una propiedad muy importante de las unidades de mampostería, la definición adecuada de esta, influye significativamente en un buen comportamiento de las unidades, puesto que un alto contenido de agua en la muestra, es un alto indicio de una gran permeabilidad, induciendo en las unidades, variaciones volumétricas que podría causar fisuración.

Para la determinación de este ensayo, se someten como mínimo tres unidades de mampostería a evaluar, según los requerimientos establecidos por la NTC 4024, la unidad se debe incorporar en agua a temperatura ambiente durante un periodo no mayor a 24 horas, posterior a esto se mide el aumento de la masa por absorción, la cual debe estar dentro de los rangos establecidos de acuerdo al peso de la unidad.

**Tabla 2-2 Absorción de agua según su densidad  
(Concretodo, 2013)**

Absorción de agua (Aa%) según el peso (densidad) del bloque, secado al horno			
Promedio de 5 unidades, máximo, %			
Unidades / mampostería Estructural			
Peso	Liviano, menos de 1680	Mediano de 1680 hasta menos de 2000	Normal, 2000 o más
Clase alta	15	12	9
Clase baja	18	15	12
Unidades / mampostería no Estructural			
Chapa	15	12	9
Unidad	18	15	12

$$\text{Absorción \%} = \frac{\text{masa}_{s2} - \text{masa}_{s1}}{\text{masa}_s} * 100$$

$$\text{Absorción \%} = \frac{m_s - m_{s1}}{m_s} * 100 \quad (3)$$

$$\text{Coeficiente de saturación} = \frac{m_{s2} - m_{s1}}{m_s - m_{s1}} * 100 \quad (4)$$

- Contenido de humedad

Es un indicativo de la presencia de humedad en el bloque, estando presente, en un gran porcentaje, puede provocar en las unidades de mampostería fisuración, el procedimiento para la elaboración del ensayo, es con base en los requisitos establecidos por la NTC 4024.

$$\text{Contenido de humedad \%} = \frac{m_s - m_{s-}}{m_s} * 100 \quad (5)$$

- Resistencia a la compresión.

Esta propiedad es quizás una de las más importantes de las unidades de mampostería, su adecuado control permite evaluar, desde la calidad de los materiales empleados, como la dosificación de estos, así como también la durabilidad; el ensayo se realiza con base en los requerimientos de la NTC 4024 para unidades en concreto. Para el ensayo se emplea una maquina la cual permite la aplicación de una carga axial en la unidad a fallar, con base en este resultado, se determina la resistencia a la compresión como una relación entre la carga aplicada y el promedio de áreas de la cara superior e inferior.

**Tabla 2-3 Valor mínimo de la resistencia a la compresión Mpa (kg/cm<sup>2</sup>) de bloque de concreto y valor de la Absorción de agua según la densidad del concreto secado al horno (Concretodo, 2013)**

Resistencia a la compresión a los 28 d (Rc <sub>28</sub> ) <sup>b</sup> , evaluada sobre el área neta promedia (Anp)			Absorción del agua (Aa), en % según el peso (densidad) del concreto secado al horno, kg/m <sup>3</sup>	
Mínimo <sup>b</sup> , Mpa			Promedio de 3 unidades, máximo, %	
Clase	Promedio de 3 unidades	Individual	Peso mediano, de 1680 kg/m <sup>3</sup> hasta menos de 1900 kg/m <sup>3</sup>	Peso normal, 1900 kg/m <sup>3</sup> o más
Alta	13	11	12%	9%
Normal	10	9	15%	12%

Se debe determinar:

- Resistencia a la compresión sobre el área neta

$$\text{Resistencia a la compresión sobre el área neta (Rc)} = \frac{C_m}{A} \quad (6)$$

C<sub>max</sub>: carga máxima a la compresión

Anp: área neta del espécimen en mm<sup>2</sup>

- Resistencia a la compresión sobre el área bruta

$$\text{Resistencia a la compresión sobre el área bruta (Rc)} = \frac{C_{\text{m}}}{A} \quad (7)$$

C<sub>max</sub>: carga máxima a la compresión

Ab: área bruta del espécimen en mm<sup>2</sup>

- Resistencia a la tensión.

Esta propiedad, define la durabilidad de la unidad de mampostería, permite conocer el modo de falla cuando está sometida a grandes esfuerzos de flexión o compresión, por la dificultad del ensayo, este no es muy común; el ensayo de módulo de rotura es un ensayo alterno, en el cual la unidad de mampostería de concreto se apoya en los tercios de la luz, y se le aplica una carga axial sobre el centro de la unidad, hasta llegar al punto de falla. Generalmente en las unidades de concreto la rotura varía entre un 10% y un 20% de la resistencia a la compresión. (Takeuchi, 2007)

Los ensayos para determinar cada una de las propiedades de las unidades de concreto, se deben realizar siguiendo las especificaciones de la NTC 4024 (prefabricados en concreto. Muestreo y ensayos de prefabricados de concreto no reforzados vibro compactados), la NTC 4026 (bloques y ladrillos de concreto para mampostería estructural), la NTC 4076 (unidades, bloques y ladrillos de concreto para mampostería no estructural y chapas de concreto).

El uso y búsqueda de nuevos materiales ingenieriles, han permitido que hoy en día, se le esté dando solución a pequeña escala, a materiales de origen químico, comúnmente empleados en la elaboración de unidades plásticas para el almacenamiento y conservación de comida y bebidas, estos materiales en el mundo genera millones de toneladas en desechos, que, por falta de una buena disposición, terminan contaminando el medio ambiente.



### **2.3 Antecedentes de Investigación sobre el tema**

En la actualidad, el creciente uso de nuevas tecnologías y la aplicación de nuevos materiales en la ingeniería civil han generado que día a día se esté avanzando en la búsqueda de soluciones a distintos problemas que no solamente estén ligados con el factor económico sino también con el factor ambiental, generando en los ingenieros la necesidad de emplear materiales abundantes en el medio que diariamente son empleados por la sociedad en sus actividades diarias, pero que por sus características físico mecánicas pueden llegar a dárseles un uso mucho más racional, aliviando el impacto que estos generan en el medioambiente.

Constantemente se han visto grandes avances en la utilización de todo tipo de material reciclable, en especial de los plásticos, puesto que por sus características mecánicas se han venido empleando en la elaboración de todo tipo de elementos empleados en la construcción, uno de estos elementos es la fabricación de unidades de mampostería no estructural, empleada generalmente en la elaboración de muros divisorios o muros fachada. Las unidades de mampostería se elaboran con un porcentaje de PET triturado para suplir la cantidad del agregado pétreo empleado.

Investigaciones realizadas en la universidad central de Venezuela, como un aporte más a los problemas críticos ambientales, generados por el PET, es la implementación de este en la elaboración de unidades y mezclas de concreto, su investigación, consistió en la elaboración de tres tipos de mezclas de concreto, en donde un buen porcentaje de los agregados fue remplazado por una porción de material reciclado PET, se elaboraron cerca de 21 muestras con variaciones en la cantidad de Tereftalato Polietileno, con porcentajes comprendidos entre 5%,10% y 15%.Una vez elaboradas las mezclas y su posterior curado durante 28 días lograron determinar que, al variar la cantidad de PET , se afectaba directamente no solo la resistencia a la compresión de las unidades, sino además, se veían afectadas propiedades como la absorción y la resistencia a la abrasión, sin embargo, no se puede sustituir del todo la presencia de un agregado (arena),

puesto que el solo material cementante y el PET no logran una correcta cohesión. (Alesmar, Rendon , & Korody, 2008).

El PET es un material que se puede emplear en la elaboración de distintos materiales que se pueden usar en la construcción, investigaciones recientes han encontrado la aplicabilidad del Tereftalato Polietileno en la mezclas de mortero de pega y en la construcción de unidades de mampostería (bloques), de los ensayos realizados, determinaron, que la variación del material plástico influye significativamente en el comportamiento a compresión, en la fluidez de la mezcla y en la capacidad de deformación elástica cuando la unidad de concreto es sometida a grades esfuerzos de flexo-compresión. (Chowdhury, Tashkan, & Suganya, 2013)

En distintos países de América del sur ,en Chile y Argentina han considerado la posibilidad de emplear materiales plásticos para la construcción de viviendas, en donde no solo se elabore unidades de mampostería, sino además losas prefabricadas, de los ensayos realizados a estas unidades prefabricadas, lograron encontrar que ofrecen una buena resistencia a la compresión, no de alto grado pero si apta para las bajas sollicitaciones de carga; presentaron una buena resistencia a la abrasión, los muros de mampostería pueden ser fácilmente revocados por la buena adherencia de estos materiales, demostrando sin duda que el PET, es un material que puede ser apto para elaborar elementos no estructurales que no demanden un alto grado de carga axial. (Gaggino, 2008).

En países como Ecuador , uno más que se une a la problemática ambiental, buscando darle un mejor uso a los residuos plásticos; un estudio realizado en Quito, consistió en elaborar bloques de mampostería en concreto, para ser empleados en la construcción de viviendas, con la finalidad de reducir costos en la elaboración de estas y lograr mejorar en cierto grado la calidad de vida de la población más pobre, su estudio se centró en la fabricación de varias unidades de mampostería en concreto, variando solamente la cantidad de Tereftalato de Polietileno; de las muestras elaboradas pudo verificar, que el aumento del PET triturado y del tamaño del agregado plástico, influían significativamente en la mejora de la resistencia de

la unidades, además de esto, el costo de elaboración de un muro con unidades tradicionales en relación con las unidades mezcladas con el material plásticos se veían reducidos en un buen porcentaje, al no necesitar en la mayoría de los casos una mano de obra calificada, clasificando a este material como apto y propicio, al contar con una buena resistencia a la compresión. (Pullaguari, 2010)

Debido a la problemática que presenta el manejo de materiales como el plástico (PET), nuevas ideas para tratar esta problemática se han venido presentando, en Colombia especialmente en la ciudad de Acacías Meta, en donde se realizó un proyecto elaborado por estudiantes de la universidad de la Salle, quienes a partir del Tereftalato Polietileno, originaban unidades de mampostería que fueran aptas para emplearlas en la construcción de viviendas de interés social, tratando una problemática ambiental que se presentaba en la zona con el manejo de residuos plásticos, su investigación se basó; en determinar las características físico mecánicas de unidades elaboradas con PET, de los resultados obtenidos pudieron conocer que las unidades plásticas, son aptas para la construcción de viviendas de interés social, sin embargo no cumple con algunas de las propiedades para las unidades de mampostería, como lo es la absorción, en cuanto a resistencia y abrasión, presenta valores adecuados, lo cual les permitió concluir, que este tipo de unidades a nivel económico es totalmente viable, y a nivel estructural es propicio para emplearlo en la elaboración de viviendas de interés social. (Molina, vizcaino, & Ramirez, 2007).

## **2.4 Marco Normativo**

Las normas que se relacionan a continuación son las que regirán el desarrollo de este proyecto de investigación.

- NTC 77 Tamizado de Materiales Granulados (Agregados o Áridos)

- NTC 78 Agregados para Hormigón Determinación del Porcentaje de Material que Pasa por el Tamiz NTC 74 Método de Lavado.
- NTC 92 Método para Determinar la Masa Unitaria de los Agregados.
- NTC 127 Método para Determinar el Contenido Aproximado de Materia Orgánica en Arenas Usadas en la Preparación de Morteros y Hormigones.
- NTC 237 Método para Determinar el Peso Específico y la absorción de Agregados Finos.
- NTC 247 Bloques Huecos de Hormigón para Muros.
- NTC 682 Materiales Refractarios. Determinación de la Resistencia a la Rotura por Compresión y por Flexión en Frío.
- NTC 4024 Prefabricados de Concreto. Muestreo y Ensayos de Prefabricados de Concreto no Reforzado, Vibrocompactado.
- NTC 4017 Métodos para Muestreo y Ensayos de Unidades de Mampostería de Arcilla.
- NTC 4026 (Bloques y Ladrillos) de Concreto para Mampostería Estructural.
- NTC 4076 (Bloques y Ladrillos) de Concreto para Mampostería No Estructural Interior y Chapas de Concreto.
- NTC 4383 Mampostería de Concreto. Términos y Definiciones.

Según la Norma Sismo Resistente del 2010 existen diversas clasificaciones de mampostería estructural y diversos tipos de unidades. Veamos

**Tabla 2-4 Clasificación de mampostería estructural**

Mampostería estructural		
Clasificación	Descripción	Sistema Estructural
Mampostería de cavidad reforzada	Dos paredes de mampostería separadas por concreto reforzado.	Capacidad especial de disipar la energía en el rango inelástico (DES)
Mampostería reforzada externamente	Piezas de mampostería con perforación vertical reforzadas internamente	Capacidad especial de disipar la energía en el rango inelástico (DES) cuando todas sus celdas sean rellenas de mortero o con mínimos de refuerzo. Con capacidad moderada de disipar la energía en el rango inelástico (DMO) si se rellenan solo las celdas que tienen refuerzo
Mampostería parcialmente reforzada	Piezas de mampostería con perforación vertical reforzadas internamente	Capacidad moderada de disipar la energía en el rango inelástico (DMO)
Mampostería no reforzada	Piezas de mampostería que no cumplen con las cuantías mínimas de refuerzo.	Capacidad mínima de disipar la energía en el rango inelástico (DMI)
Mampostería de muros confinados	Piezas de mampostería, reforzadas por elementos de concreto reforzado alrededor	Capacidad moderada de disipar la energía en el rango inelástico (DMO)
Mampostería de muros diafragma	Piezas de mampostería, colocados dentro de una estructura de pórtico	No se permite para edificaciones nuevas
Mampostería reforzada externamente	Es la mampostería reforzada dentro del revoque, fijándose con clavos o conectores.	Capacidad mínima de disipar la energía en el rango inelástico (DMI)

**Tabla 2-5 Tipo de unidades de mampostería**

Unidades de Concreto	Bloque de perforación vertical portante NTC 4026 (ASTM C90)
	Portantes de concreto macizas NTC 4026 (ASTM C55)
	Unidades de concreto no reforzada para mampostería NTC 4076 (ASTM C129)
Unidades de Arcilla	De perforación vertical para mampostería estructural NTC 4205-1 (ASTM C34)
	Maciza para mampostería estructural NTC 4205- 1 (ASTM C62 - C652)
	Para mampostería no estructural NTC 4205- 2 (ASTM C56 - C212 - C216)
	De perforación horizontal para mampostería estructural NTC 4205- 2 (ASTM C56 - C212)
	De arcilla cocida para fachadas NTC 4205- 3
Unidades Silico - Calcáreas	Cumplen con la norma NTC 922 (ASTM C73)

## **3 Metodología**

### **3.1 Introducción**

El elevado costo de materiales en la construcción, los altos índices de contaminación ambiental han sido causales para enfocar la presente investigación hacia la elaboración de una unidad de mampostería elaborada a base de PET, que favorezca no solo la economía de la construcción, también la disminución de la contaminación con materiales que circundan en el entorno (botellas de plástico PET), la incursión en un proyecto de proyección social en que a base de unidades de mampostería elaborada con PET puedan construirse viviendas de interés social que beneficien a miles de personas en el país y fuera del él y que finalmente esta unidad cumpla con las normas de sismoresistencia que pide la norma de calidad.

Desde años atrás, países de América y Europa, han intentado buscar estrategias frente a dicha problemática usando las platinas de acero en la construcción. Sin embargo, esta estrategia no pudo ser desarrollada, debido a los altos costos en la instalación de la platina, el peso de la estructura aumentó y a eso se adicionó la corrosión de las mismas. Es por lo anterior, que surge la necesidad de buscar un material de bajo costo, liviano, resistente y que no solo beneficie la construcción sino también la problemática ambiental y social.

Pues bien, el proceso al que se hace referencia en el anterior párrafo es la elaboración de una unidad de mampostería que será elaborado a base PET triturado. Entre las ventajas del uso de este material, en la elaboración de una unidad de mampostería se encuentran: la disminución de material de desperdicio en

muros y acabados lo que permite que pueda ser aplicado directamente sobre muros, estucos o pinturas; dentro de las celdas de los muros elaborados, pueden colocarse conducciones eléctricas, hidrosanitarias y de telecomunicaciones, La utilización de la formaleta es eliminada, permite el uso de entrepisos prefabricados, provee al sistema aislamiento térmico debido a sus características físicas. Por otro lado, dentro de las desventajas se evidencian la necesidad de un diseño arquitectónico riguroso que favorezca la adecuación vertical y horizontal de los muros, por su diseño estructural no permite hacer modificaciones en los espacios interiores.

### **3.2 Recopilación de la información**

Se recolecta la información que se encontró a cerca de aquellos temas relacionados con el proyecto de investigación propuesto, poniendo mayor atención a los mampuestos de concreto, al reciclado y características del PET.

### **3.3 Selección de la Bloquera**

Inicialmente se intentó elaborar los mampuestos manualmente, pero esto no fue posible, debido a las características del PET la fuerza del hombre no era suficiente para compactar dicho material, cuando el mampuesto iba a ser desmoldado, se desbarataba una de sus caras frontales.

Para poder llevar a cabo con éxito la fabricación de estos especímenes, fue necesario el uso de una máquina bloquera vibro compactadora, estacionaria y que puede producir alrededor de 2000 bloques en 8 horas. Se caracteriza por tener un motor de 3 Hp y 3600 rpm. El vibrado permite que la calidad del bloque sea mayor, evitando que al ser desmoldados se altere su forma.



Los especímenes fueron elaborados en la ciudad de Ibagué Tolima.

### **3.4 Muestreo**

Se realizó con la misma dosificación empleada por la fábrica de bloques El Sol de la ciudad de Ibagué, Tolima, donde serán adquiridos 6 unidades de mampuestos en concreto, para realizarse las pruebas de laboratorio que permitan hacer la comparación de dichos especímenes.

### **3.5 Caracterización de los materiales**

#### **3.5.1 Caracterización de la arena**

El tipo de este material usado en la elaboración de la unidad mampostería es arena proveniente de la Cantera la Caima, ubicada en el municipio de Alvarado, departamento del Tolima. Esta arena se caracteriza por ser de alta calidad. Se usó en este proyecto porque sus granos son muy pequeños lo que la hace más fina. La arena se origina gracias a la desintegración de las rocas de forma natural o cuando se realiza trituración de estas. Normalmente los diámetros del grado de arena son inferiores a los 5mm y está compuesta por dióxido de silicio. Aunque la arena es un material que se puede conseguir en ríos, lagunas, lagos y volcanes se decidió obtenerla directamente de la vereda la Caima por sus características.

La arena es uno de los materiales usados en el mundo para la construcción. Una de las características de la arena es la capacidad para comprimirse fácilmente, Por lo que es usado para reforzar muros y cimentar ciertos tipos de suelos. Cabe resaltar que, dependiendo de la pureza de la arena, depende la dureza o el tiempo de secado del hormigón

Para fundar las propiedades del material se debe evaluar la granulometría del agregado fino, el porcentaje de material que pasa por el tamiz No 200, peso unitario, contenido de materia orgánica y el peso específico y absorción.

Los ensayos que permitieron determinar las características del agregado fino se realizaron en el laboratorio de Ingeoconsultores Ltda., de la ciudad de Ibagué, Tolima.

### **3.5.1.1 Ensayo granulométrico del agregado fino**

Este método se realiza con el fin de determinar la composición granulométrica y el módulo de finura del agregado fino.

Para la elaboración del ensayo emplearemos los siguientes equipos:

- Balanza.
- Horno.
- Pala para cuartear la muestra.
- Máquina zarandeadora con movimiento lateral o lateral vertical.
- Tamices según la norma NTC 32.

Se humedece la muestra y se obtiene una muestra representativa por el método de cuarteo, la muestra después de secada, debe tener un peso aproximado de 500 gramos. La fracción retenida en el tamiz al completar la operación debe pesar menos de 200 gr. Si sucediera lo contrario habría que fraccionar nuevamente la muestra.

Se seca la muestra en el horno a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta que no sufra una pérdida de peso mayor de 0.1%.

Se ordenan los tamices en forma decreciente y se incorpora la muestra en la parte superior. Se zarandean los tamices manualmente con movimientos circulares constantes o por medio mecánico entre 5 a 10 minutos. Cuando no pase más del 1% de la muestra por lo tamices se culmina con este procedimiento y se mide el peso retenido en cada tamiz.

Se calculan los porcentajes retenidos en cada tamiz según el peso total de la muestra.

El módulo de finura define un factor empíricamente que permite estimar que tan fino o que tan grueso es el material.

Los resultados obtenidos en este ensayo son:

**Límites de Atterberg**

**Tabla 3-1 Límite líquido de la arena**

Ensayo No	No líquido
Tara No	
No de golpes	
Peso suelo húmedo + tara	
Peso suelo seco + tara	
Peso tara	
Porcentaje de humedad (%)	

**Tabla 3-2 Límite Plástico de la arena**

Ensayo No	No plástico	Promedio N.P.
Tara No		
Peso suelo + Tara húmedo		
Peso suelo + Tara seco		
Peso tara		
% de humedad		

**Tabla 3-3 Granulometría**

Peso total de la muestra húmeda (g)	Humedad Natural		
	$(W1 - W2) / (W2 - W3) \times 100$		
	W1	W2	W3

Peso total de la muestra seca	1839	Peso total del material después de lavado		1777
Tamiz	Peso retenido individual	% Retenido individual	% Retenido acumulado	% Que pasa
Pulgada				
3/8"	2	0,1	0,1	99,9
No 4	141	7,7	7,7	92,2
No 8	290	15,8	23,4	76,5
No 16	419	22,8	46,2	53,7
No 30	356	19,4	65,6	34,3
No 50	312	17,0	82,5	17,3
No 100	194	10,5	93,1	6,8
No 200	64	3,5	96,5	3,3
Fondo	62	3,3	99,9	0,0

### Clasificación

Límite líquido	<u>N.L. (%)</u>	Índice de grupo	<u>----</u>
Límite plástico	<u>N.P. (%)</u>	Clasificación AASHTO	<u>----</u>
Índice de plasticidad	<u>N.P. _____</u>	Clasificación U.S.C.	<u>----</u>

#### 3.5.1.2 Porcentaje de material que pasa el tamiz No 200

Este ensayo determina por lavado la cantidad de material que pasa por el tamiz No 200.

El equipo empleado para el desarrollo de la prueba es:

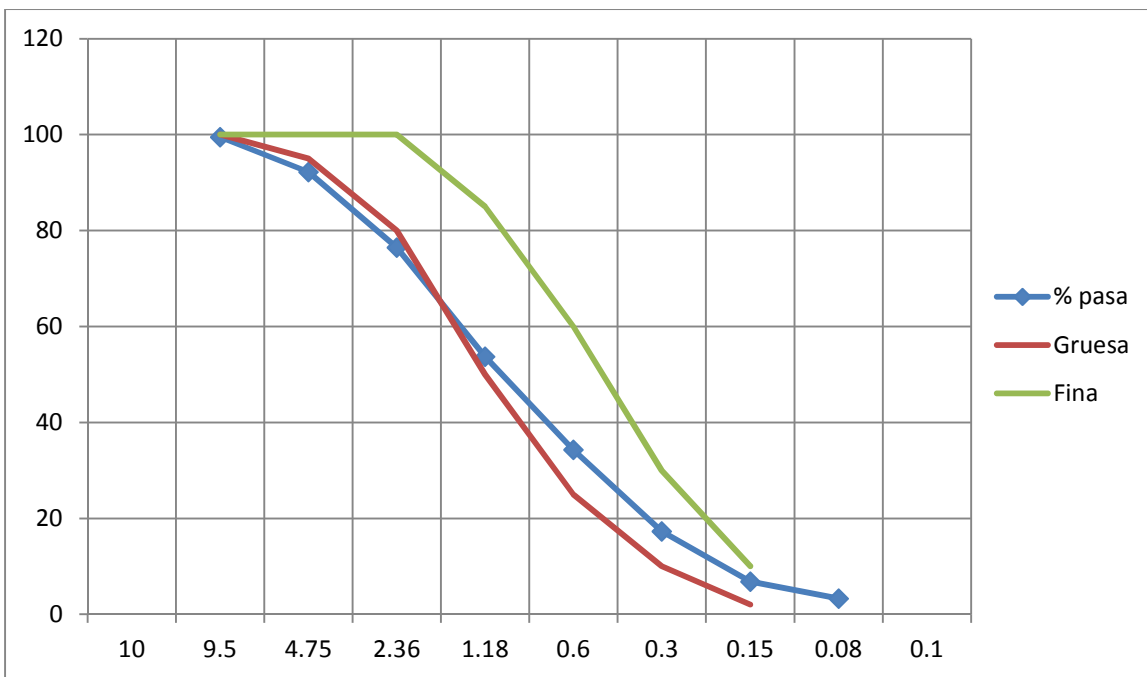
- Balanza.
- Tamices.
- Horno o estufa.
- Recipiente.

Se mezcla el agregado y se realiza por cuarteo hasta obtener una cantidad considerable. Se humedece el agregado para minimizar la segregación y la pérdida de polvo.

La muestra seca deberá contar con unos valores mínimos estandarizados. Después de secarse la muestra hasta que su peso sea constante, se vierte en un recipiente con agua, se agita hasta que las partículas finas queden en suspensión y se vacía el agua de lavado, se repite el procedimiento hasta que el agua de lavado sea clara. El material que queda en el recipiente y en los tamices se seca.

El material que pasa por el tamiz No 200 se calcula por medio de una fórmula y el informe debe expresar el porcentaje de material fino con una precisión de 0.1%.

Los resultados obtenidos en este ensayo fueron los siguientes:



**Ilustración 3-1 Gráfico % de arena que pasa por el tamiz**

**Tabla 3-4 Resultados módulo de finura de la arena**

P1:(g)		1839	P2:(g)		1777	Especificación. INVIAS	
Tamiz	Abertura	Peso	% Ret	% Acu	% Pasa	Gruesa	Fina
3/8"	9.5	2	0.1	0.1	99.9	100	100
No 4	4.75	141	7.7	7.8	92.2	95	100
No 8	2.36	290	15.8	23.5	76.5	80	100
No 16	1.18	419	22.8	46.3	53.7	50	85
No 30	0.6	356	19.4	65.7	34.3	25	60
No 50	0.3	312	17	82.7	17.3	10	30
No 100	0.15	194	10.5	93.2	6.8	2	10
No 200	0.08	64	3.5	96.7	3.3		
Fondo	---	62	3.3	100			

**Módulo de finura = 3.19**

### 3.5.1.3 Peso unitario del agregado fino

Este ensayo describe los procesos para determinar el peso unitario de los agregados finos sueltos y compactados.

Los equipos a emplear en este ensayo son:

- Balanza.
- Varilla compactadora.
- Pala o cuchara.
- Flexómetro.
- Recipiente de medidas.

La mezcla debe secarse y reducirse por cuarteo.

Para el peso unitario de agregado compactado se usa la varilla compactadora agregando el material en tres capas de igual volumen hasta llenarlo. Cada capa se apisona con la varilla dando 25 golpes.

Para el peso unitario de agregado suelto se llena el recipiente con una pala o cuchara a una altura no mayor de 5cm y se enrasa con una regla o con la mano.

El peso de la muestra es la diferencia del peso del recipiente lleno y el recipiente vacío. Y el peso unitario es el cociente del peso de la muestra y el volumen del recipiente.

Los resultados obtenidos no deben diferir en más del 1%.

Los resultados arrojados con este ensayo de peso unitario suelto y compacto fueron los siguientes:

**Tabla 3-5 Resultados Peso unitario suelto de la arena**

Muestra	1	2	3	Promedio
W.s + W.r (g)	6483.00	6485.00	6478.00	6481.80
W.r (g)	2095.00	2095.00	2095.00	2095.00
W.s (g)	4388.00	4390.00	4383.00	4386.80
V.r (cm <sup>3</sup> )	2675.00	2675.00	2675.00	2675.00
M.U.S. (g/cm <sup>3</sup> )	1640.40	1640.90	1638.50	1639.90
Gs. Aparente (S)	2.63	2.63	2.63	2.63
$V=100((S*W)-M.U.S.)/(S*W)$ (%)	37.72	37.70	37.80	37.74

**Tabla 3-6 Resultado peso unitario compacto de la arena**

Muestra	1	2	3	Promedio
W.s + W.r (g)	6797.00	6802.00	6806.00	6801.50
W.r (g)	2095.00	2095.00	2095.00	2095.00
W.s (g)	4702.00	4707.00	4711.00	4706.50
V.r (cm <sup>3</sup> )	2675.00	2675.00	2675.00	2675.00
M.U.C. (g/cm <sup>3</sup> )	1757.80	1759.60	1760.90	1759.40
Gs. Aparente (S)	2.63	2.63	2.63	2.63
$V=100((S*W)-M.U.C.)/(S*W)$ (%)	33.27	33.20	33.15	33.20

Donde

W.s + W.r Masa de la muestra más recipiente.

W.r Peso del recipiente.

W.s Peso de la muestra.

V.r	Volumen del recipiente.
M.U.S.	Peso unitario suelto.
M.U.C.	Peso unitario compacto.
G.s	Gravedad específica aparente (S) base seca, determinada con las normas NTC 176 y 237.
W	Densidad del agua (998 Kg/m <sup>3</sup> )
V	% de vacíos.

#### **3.5.1.4 Contenido de materia orgánica.**

Este ensayo señala la presencia de material orgánico nocivo para la arena natural que ha de usarse en morteros o concretos.

El ensayo colorimétrico permite definir si la arena con material orgánico es o no acta para ser utilizada.

Los equipos a usar en este ensayo son:

- Frascos.
- Reactivos.

Se llena un frasco transparente con 130 cm<sup>3</sup> con la muestra. Se le añade hidróxido de sodio en agua hasta que el volumen de agua y arena den 200 cm<sup>3</sup>. Se tapa, se agita y se deja en reposos durante 24 horas.

Faltando dos horas se llena un frasco con solución de referencia hasta completar un volumen de 75 cm<sup>3</sup>. Se comparan el color de los líquidos de los dos frascos.



Si el resultado da una cifra mayor de 3 no se desecha el material. En este caso se procede a hacer el ensayo de compresión de cubos para definir la calidad de la arena.

Los resultados arrojados para esta muestra fueron los siguientes:

**Tabla 3-7 Resultados de materia orgánica presentes en la arena**

Tamaño máximo nominal 4,75 mm (No 4) o menor	Masa Original de la muestra seca  (g)	Masa de la muestra seca, después de lavada  (g)	Partículas deleznables  (%)
300.00	300.00	297.30	0.90
Partículas deleznables (%)		0.90	
Porcentaje máximo especificado		1.00	
Estado		Cumple	

### 3.5.1.5. Peso específico y absorción.

Este ensayo determina el peso específico, el peso específico aparente y la absorción del agregado fino.

Los equipos a emplear en este ensayo son los siguientes:

- Balanza.
- Bandejas.
- Secador de pelo.
- Picnómetro o probeta.
- Molde metálico.
- Compactador mecánico.
- Cuchara o espátula.
- Horno o estufa.

Se toman 1000 gr de agregado por el método del cuarteo.

Se sumerge la muestra en agua durante 24 horas, luego se extiende en una superficie no absorbente, se agita con frecuencia y se expone a corriente de aire suave y caliente, hasta que las partículas queden sueltas.

Se coloca la muestra en un recipiente cónico y se deja caer libremente el pisón 25 veces y se alisa la muestra. Esta actividad se repite varias veces hasta que la muestra se derrumbe ligeramente al separarse del molde.

Se pesa la muestra saturada con superficie seca y se introducen unos 500 gr en la probeta con 100 cm<sup>3</sup> de agua y luego se completa con agua a 20<sup>o</sup>C y hasta cerca de 500 cm<sup>3</sup> y se gira la probeta para eliminar las burbujas de aire.

Se coloca la probeta durante una hora en baño maría y luego se vuelve a completar los 500 cm<sup>3</sup> de agua. Finalmente se pesa y se determina por diferencia el peso de agua añadida. Se retira la muestra y se seca, se deja enfriar y se pesa. Se determina el peso del picnómetro lleno de agua hasta su capacidad de calibración. Para terminar, se determinan los pesos.

**Tabla 3-8 Datos de laboratorio**

Muestra	1	2	Promedio
Ws (A) (g)	493.00	492.80	492.90
Ww (B) (g)	873.00	873.00	873.00
WT (C) (g)	1179.10	1179.20	1179.15
Ws.s.s (D) (g)	500.0	500.00	500.00
Ww' = B-C+D (cm <sup>3</sup> )	193.90	193.80	193.85
Gs. Bulk = A / (B-C+A) (gr/cm <sup>3</sup> )	2.54	2.54	2.54
Gs. Bulk s.s.s. = D / (B-C+D) (gr/cm <sup>3</sup> )	2.57	2.58	2.57
Gs. Bulk Apar = A / (B-C+D) (gr/cm <sup>3</sup> )	2.63	2.64	2.63
% Abs = (A - D) / A*100 (%)	1.42	1.46	1.44

Donde

$W_s =$  Peso de la muestra seca (A)

$W_w =$  Peso del frasco lleno de agua (B)

$W_T =$  Peso frasco lleno muestra S.S.S. más agua (C)

$W_{s.s.s.} =$  Peso de la muestra saturada y superficialmente seca (D)

$W_w' =$  Volumen desalojado por la muestra.

$G_s. Bulk =$  Densidad nominal

$G_s. Bulk s.s.s. =$  Peso específico saturado y superficialmente seco.

$G_s BulkApar =$  Peso específico aparente.

% Absorción.

### 3.5.2 Caracterización del PET

Para la transformación del PET en escamas comprendido entre los 2 y 8 mm se debe iniciar con el proceso de reciclaje, consiste en la selección y clasificación del material, garantizando que va a estar libre de contaminaciones de P.V.C que se pueden filtrar por botellas parecidas o en capuchones de seguridad con que se cubre las tapas de las botellas. Para evitar la contaminación de los plásticos con estos agentes contaminantes, es necesario hacer previamente una clasificación teniendo en cuenta que cada una de estas botellas contiene en su fondo un código en forma triangular dentro del cual se encuentra un número el cual permite saber el tipo de resina de plástico. Es de mencionar, que en algunos casos, las botellas no contienen este número lo que hace compleja su clasificación. Posteriormente a esta selección se realiza la trituración, este proceso se hace en un molino especializado para PET el cual contiene varias cuchillas

que van girando a medida que se va dando la trituración de las botellas hasta llegar a la obtención del tamaño de las escamas las cuales pueden variar dependiendo del diámetro de los orificios de la criba, garantizando que las botellas queden convertidas en granos homogéneos. El siguiente es el proceso de lavado que determina la calidad del material y hace que disminuya propiedades como el brillo que es además altamente contaminante al medio ambiente, por lo tanto, se realiza el lavado con un champú que retira el pegante de la etiqueta, además ayuda a remover arenas, suciedad, líquidos impregnados. Posteriormente la fase de descontaminación, en este proceso el material es sometido a una rigurosa descontaminación donde se enjuaga el material y se remueven todas las impurezas y suciedades que tienen los materiales al llegar al proceso de selección. Luego, se continúa con el de eliminación de agua a través del centrifugado.

Una vez realizado el proceso de centrifugación, se lleva a cabo el transporte neumático en el que las escamas del PET, después de ser centrifugadas salen y recibe una corriente de aire producida por un soplante y a la vez son arrastradas hacia el ciclón y seguidamente caen a la cinta de inspección, llamado así porque es allí en donde el material es inspeccionado visualmente y se libera de aquellos materiales que pueden ser contaminantes. Al llegar al final de la cinta de inspección, se realiza el proceso de zarandeo en donde se realiza la granulación del PET de acuerdo al diámetro deseado y desde este lugar son enviadas hasta el sitio de almacenamiento. Dependiendo del color del PET, su precio puede variar, en el caso de los colores transparentes obtienen mayor valor. Para finalizar, se lleva a cabo la etapa de envasado en bolsones y está listo para comercializarlo.

En términos generales el PET presenta una estructura molecular estructural, la cual es necesaria para alcanzar un potencial de cristalización. También presenta una moderada flexibilidad molecular que se refleja en que su temperatura de transición vítrea que se encuentra entre los 70- 80°C. La densidad del PET puede estar entre 1,33-1,34 g/cm<sup>3</sup> para un material amorfo y 1,45-1,51g/cm<sup>3</sup> si es semicristalino.

**Tabla 3-9 Datos técnicos del PET. Industria del plástico. Plástico industrial. Richardson & Lokensgard**

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	1.34 – 1.39
Resistencia a la tensión	Mpa	59 – 72
Resistencia a la compresión	Mpa	76 – 128
Resistencia al impacto, Izod	J/mm	0.01 – 0.04
Dureza	--	Rockwell M94 – M101
Dilatación térmica	10- /°C	15.2 – 24
Resistencia al calor	°C	80 – 120
Resistencia dieléctrica	V/mm	13780 – 15750
Constante dieléctrica (60 Hz)	--	3.65
Absorción de agua (24 h)	%	0.02
Velocidad de combustión	mm/min	Consumo lento
Efecto luz solar	--	Se decolora ligeramente
Calidad de mecanizado	--	Excelente
Calidad óptica	--	Transparente a opaco
Temperatura de fusión	°C	244 – 254

El PET empleado para esta investigación es proveniente de la ciudad de Bogotá, comercializado por la empresa recicladora PET & solo PET.

Este PET se caracteriza por estar sometido a una rigurosa selección, clasificación y descontaminación con abundante agua para remover las impurezas y suciedad. Después pasa a la máquina de centrifugado para eliminar el 95% de humedad y finalmente llevarlo a la secadora, donde con aire caliente se libera de toda humedad. Luego es triturado en un molino especializado usando cribas de diversos tamaños. En el caso de este proyecto se adquirió el PET mixto de color transparente y el de menor tamaño que produce la

empresa oscilando entre 2 mm y 8 mm, se realiza la separación mediante una zaranda que se utiliza para cernir las escamas de PET y obtener la clasificación deseada.

### 3.5.3 Cemento

En este proceso el tipo de cemento a usar fue el cemento Argos. El cemento, es una mezcla la cual se elabora a partir de la hidratación en agua de caliza y de arcilla molida. A esta mezcla se les agrega áridos como la arena para adquirir mayor fortaleza al producto que se está creando. Después son mezclados los componentes secos y luego de su hidratación, este debe aplicarse rápidamente, pues su secado es rápido.

Existen varias clases de cementos de acuerdo a su composición uno de ellos es el cemento portland una clase de cemento cocido en su materia prima; y otro tipo es el cemento siderúrgico que consiste en la mezcla del Clinker del portland y de un regulador fraguado con escoria siderúrgica, es un cemento frío es decir no eleva su temperatura al momento de fraguarse.

De acuerdo al tipo de aditivos que se usen, el cemento puede cambiar sus propiedades elásticas, hidráulicas e inclusive hasta su aspecto. Algunas de las propiedades de los productos originados a partir del cemento son las hidráulicas relacionadas con la reacción de la hidratación entre el cemento y el agua. Esto permite que el cemento pueda endurecerse así se encuentre dentro del agua; otra de las propiedades son las estéticas relacionado con el comportamiento plástico que presenta el cemento antes de endurecerse lo que facilita darle la forma deseada; las de durabilidad referidas a la calidad del cemento frente a los cambios climáticos que se presente; para finalizar estas las propiedades acústicas en el cual los materiales basados en cemento pueden servir para aislamiento acústico.



**Ilustración 3-2 Materiales empleados para la elaboración del mampuesto**

### **3.6 Diseño de la mezcla**

Para la elaboración de las unidades de mampostería conformada por material reciclable PET, es necesario la determinación de las propiedades físicas de cada uno de los materiales que lo va a conformar, desde el PET triturado hasta la calidad del cemento a usar.

El PET que se empleó para la elaboración de la mezcla de concreto, se obtuvo proveniente de la aplicación de procesos industrializados (trituración y centrifugado) que permite obtener tamaños comprendidos entre los 2 y 8 mm, adecuados para la conformación de distintos tipos de mezclas determinadas a partir de un porcentaje de PET, mezclas que se elaboraron, teniendo en cuenta las dosificaciones realizadas en los distintos procesos experimentales en las recientes investigaciones, los

cuales indican las proporciones adecuadas en volumen para la elaboración de las unidades de mampostería a base de PET, como material idóneo y alternativa de solución a una problemática ambiental.

La arena como material para la elaboración de las distintas mezclas de concreto obtenida de la cantera “la Caima”, fue sometida a un proceso de caracterización del tamaño de sus partículas (curva granulométrica) para la determinación posible de excesivo material fino que pudiese llegar a afectar las características mecánicas de las unidades de mampostería; el cemento que se empleó, cumple con las características de resistencia normal a los 28 días de 3000 psi a 3500 psi, no se usó ningún tipo de acelerante, e incorporado de aire para reducir la cantidad de agua a usar. El agua que cumplió con los requerimientos básicos y no presento alteraciones en composición física ni química debida a algún compuesto que pueda generar la formación de eflorescencias y afecte el acabado final de las unidades de mampostería.

Se elaboraron las unidades de mampostería PET, siguiendo los mismo procedimientos empleados usualmente en la conformación de unidades de concreto; la cantidad de agua usada fue determinada teniendo en cuenta las características de manejabilidad y fluidez observadas que pudiera presentar la mezcla (PET + arena + cemento + agua), puesto que los procedimientos utilizados en la determinación del porcentaje de agua comúnmente empleados para mezclas de concreto, no son aplicables, ya que se presenta un mayor consumo de agua por la presencia del Tereftalato de Polietileno.

Proporción de los Materiales en Volumen

**Tabla 3-10 Proporción de los materiales en volumen**

Arena (%)	PET (%)
80	20
70	30
60	40



Se siguieron las proporciones empleadas usualmente para la elaboración de las unidades de mampostería en concreto que es de 8:1.

Se sigue el mismo procedimiento de mezclado empleado en una mezcla de concreto, se incorporan cada uno de los materiales PET, arena, cemento y agua de acuerdo a las especificaciones y proporciones mencionadas anteriormente. Para el estudio de este mampuesto se diseñó una mezcla compuesta de un mortero ligero (arena y cemento portland), acompañado de PET triturado en dos tamaños de tamiz, con el fin de demostrar el efecto que produce las fibras de PET sobre las propiedades mecánicas del bloque y el mortero modificado.

Se pretende encontrar la cantidad volumétrica apropiada para mejorar el diseño de la mezcla y la resistencia mecánica del mampuesto.

A medida que se incrementa el porcentaje de PET, disminuye el mortero por lo tanto se obtienen morteros más livianos.



**Ilustración 3-3 Mezcla de los materiales usados para el espécimen**

### **3.7 Elaboración del Bloque de Mampostería con PET**

Una vez se han realizado las mezclas teniendo en cuenta los distintos porcentajes de arena y PET triturado, se dispone a elaborar los elementos, siguiendo los mismos procedimientos industriales empleados para elaboración de unidades en concreto; la mezcla se vierte sobre los moldes previamente definidos y con las especificaciones que debe tener una unidad comercial empleada para la elaboración de elementos no estructurales (fachadas, muros divisorios).

Para las 3 proporciones de mezclas mencionadas se elabora un número de unidades de mampostería con PET triturado suficientes para la elaboración de los ensayos que permitan determinar la resistencia de las unidades siguiendo los procedimientos establecidos en la NTC 4024.

Cuando la mezcla ha sido vertida en los moldes, se deja la superficie lisa sin imperfecciones ni irregularidades y con la maquina bloquera vibro compactadora, la cual por un periodo cercano a los 20 segundo, logra la adecuada distribución de los materiales que lo conforman generando así una mezcla heterogénea, lo que permite que las unidades no presenten zonas con vacíos o acumulaciones excesivas de materiales que puedan ser propensas a la fallas, cuando se realizan los respectivo ensayos de laboratorio.

Una vez se han obtenido las unidades de mampostería son ubicados en un lugar que garantice la protección del mampuesto de tal manera que no sufra alteraciones, se dejan por un periodo de 24 horas de fraguado manteniendo la humedad con un riego de 6 veces al día, es importante tener en cuenta el clima de la zona puesto que si hay un calor intenso o está expuesto al sol se debe realizar un riego constante, y si las condiciones son de lluvia se debe proteger los bloques para que no se presente saturación de agua, esto conlleva a que se pierda la consistencia en el producto, el curado se da al tercer día de fabricados y consiste en mantener los bloques húmedos para permitir que continúe la reacción química del cemento para obtener la calidad y resistencia especificada.

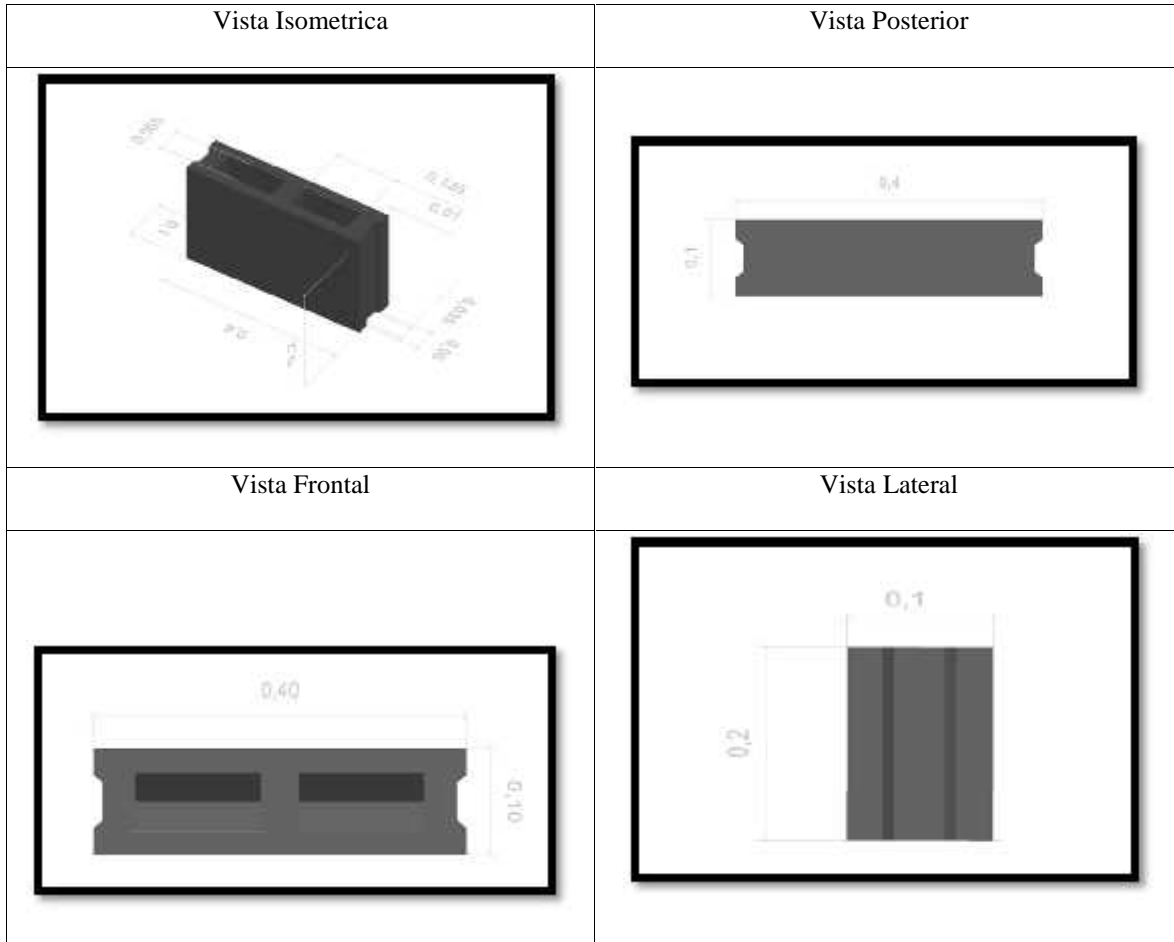
El almacenamiento de los bloques se realiza después del tercer día, encarándolos máximo quince filas y sobre una superficie plana, que esté a la intemperie para garantizar la circulación de aire. El transporte se debe realizar de manera organizada y colocando los bloques completamente unidos para que no exista espacio que dé lugar a la fisuración del mampuesto.



**Ilustración 3-4 Elaboración de unidad de mampostería con PET triturado**

Una vez se han obtenido las unidades de mampostería se dejan por un periodo corto de fraguado y luego su posterior curado, se realizan los ensayos de laboratorio correspondiente a la resistencia a la compresión, para un periodo de 28 días tiempo para el cual se obtienen las mayores resistencias en las unidades ya elaboradas.

De acuerdo a la norma NTC 4076 que rige para unidades de mampostería en concreto, no estructural se elaboró un bloque de mampostería con perforaciones verticales, piso y paredes de 20 mm de espesor. Se empleó un modelo estándar basado en bloques no estructurales de concreto con las siguientes dimensiones:



**Ilustración 3-5 Dimensiones estándar de las unidades de mampostería con PET triturado**

### 3.8 Pruebas de laboratorio

#### 3.8.1 Ensayo de Compresión

Para un bloque de mampostería no estructural en concreto es necesario que la resistencia mínima a la compresión adquirida a los 28 días sea igual a 5 Mpa por unidad y 6 Mpa en promedio por 3 unidades.

El desarrollo de este ensayo consiste en introducir una unidad de mampostería a una máquina de ensayo calibrada, donde los centros de las superficies de soporte coincidan con el centro de aplicación de la carga

del bloque. Se aplica la carga hasta la mitad de la carga máxima esperada y a una velocidad adecuada, para luego registrar la carga máxima de compresión.

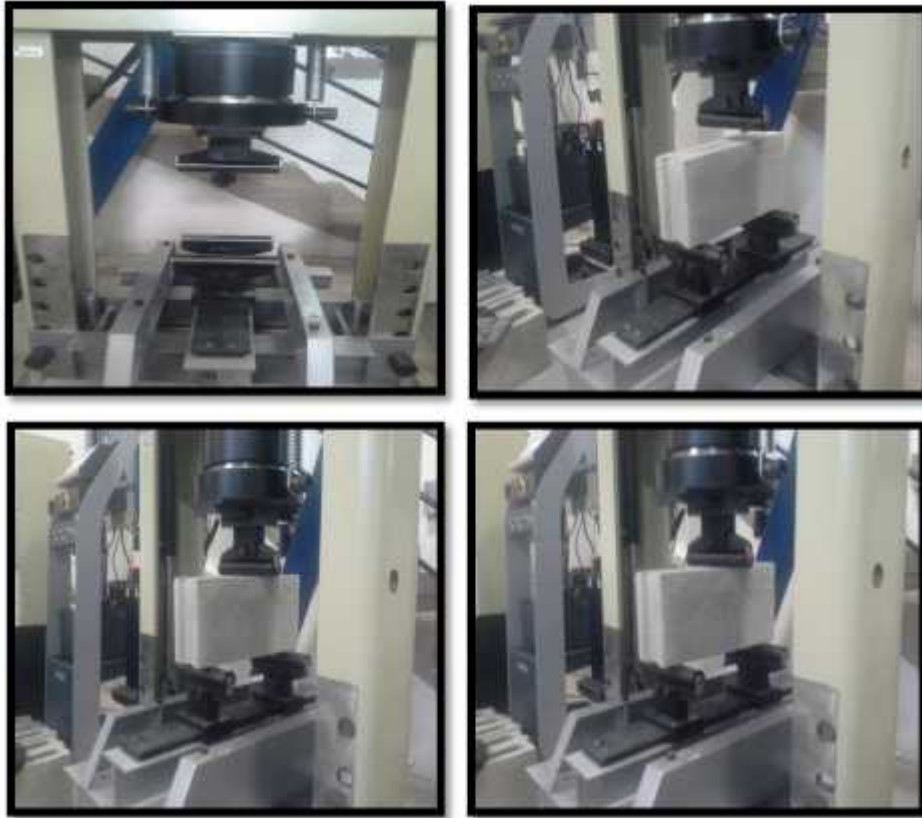
Es importante que la unidad de mampostería se encuentre libre de humedad visible.



**Ilustración 3-6 Ensayos a compresión de un espécimen de PET y arena**

### 3.8.2 Ensayo de Flexión

Este ensayo consiste en colocar la unidad de mampostería sobre una almohadilla de neopreno, apoyada en dos varillas de acero de 25mm cada una. Luego se coloca otra almohadilla de neopreno en la parte superior del mampuesto y por último se instala un bloque de madera en todo el centro del elemento para que allí se aplique la carga.



**Ilustración 3-7 Ensayo a flexión de un espécimen con PET y arena**

### **3.8.3 Módulo de Elasticidad**

Como el módulo de elasticidad es un parámetro que permite caracterizar un elemento elástico. Para los resultados de este ensayo es necesario realizar las pruebas de compresión y tensión y de esta manera hallar el módulo de elasticidad o módulo de Young.

### **3.8.4 Ensayo de Absorción de agua**

Para el desarrollo de este ensayo es necesario contar con una balanza de 0.5% del peso del espécimen más pequeño ensayado.

Se deben usar tres unidades completas, las cuales se sumergen en agua a una temperatura entre 15°C a 27°C durante 24 horas. Luego se pesan los especímenes suspendidos y sumergidos en el agua. Se retira el agua, se deja escurrir por un minuto y se secan superficialmente y vuelven a pesarse.

Luego se secan en un horno ventilado a temperatura entre 100°C a 115°C durante 24 horas y se pesan sucesivamente con intervalos de 2 horas, hasta que no presente pérdidas en su masa mayor al 0.2%.



**Ilustración 3-8 Muestreo y peso de especímenes para ensayo de absorción**



## 4 Presentación y Análisis de Resultados

Con el objetivo de conocer el estado último de esfuerzos y las cantidades óptimas de los bloques con adición de PET, se reprodujeron una serie de ensayos los cuales permitieron conocer el comportamiento mecánico del material.

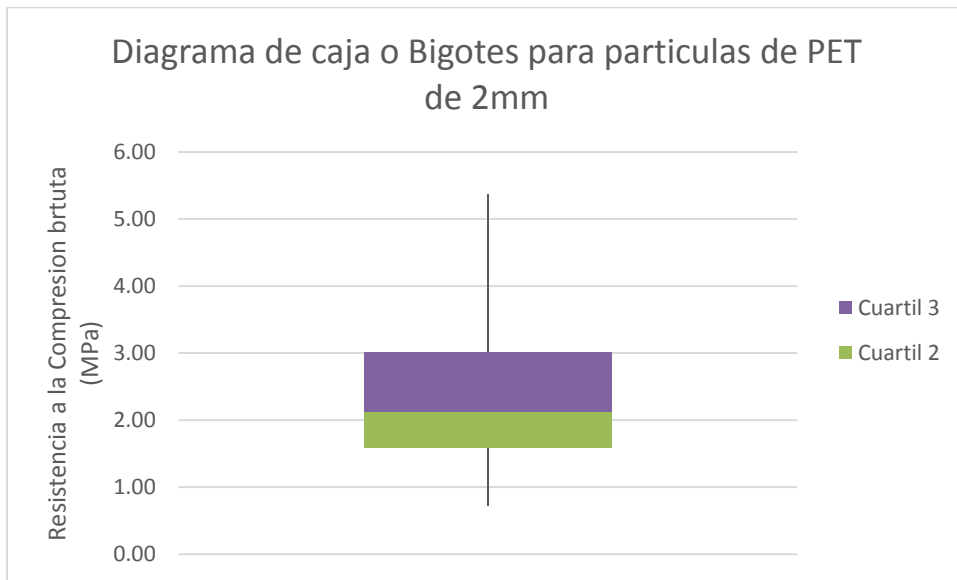
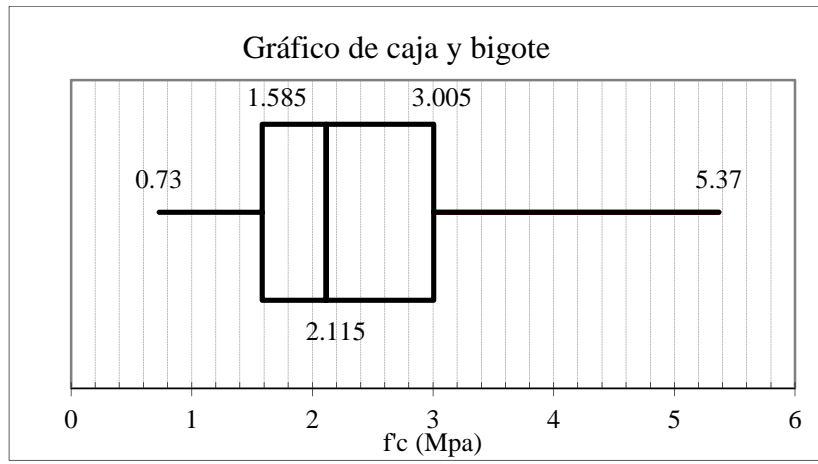
Para representar cuantitativamente en el material la presencia del PET, los bloques se encuentran clasificados bajo dos parámetros: Como índice inicial el tamaño de la partícula de PET (2mm & 5mm) y como subíndice el contenido de PET en porcentaje (0, 20%, 30%, 40% & 50%).

El primer modelo estadístico que permite conocer la distribución de datos referente a las variables de contenido de PET versus esfuerzos, es el diagrama de caja presente en las Ilustraciones 4-1 y 4-2. En el diagrama de caja se puede visualizar los valores máximos que pueden generar la adición de PET y la concentración de datos para determinar los valores más usuales en la distribución total de puntos.

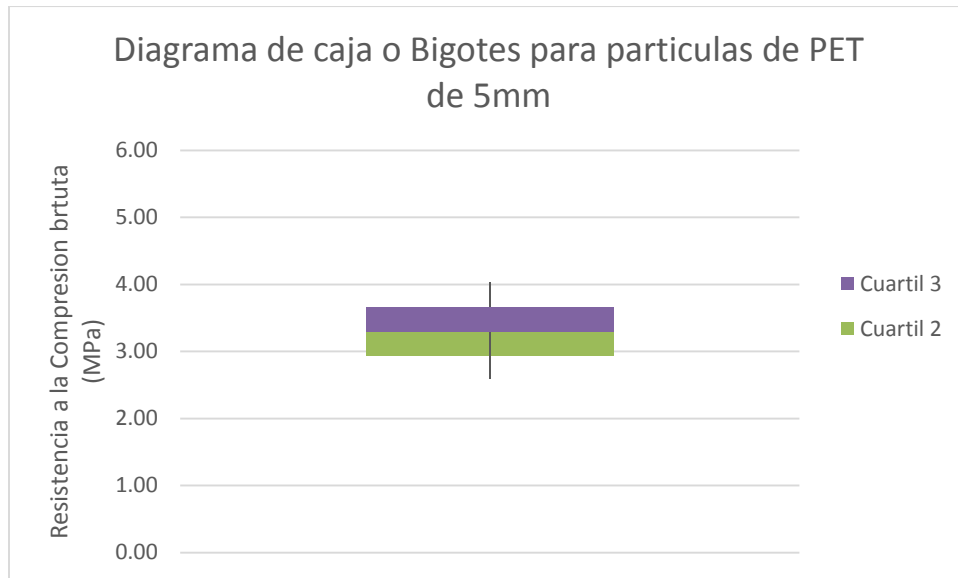
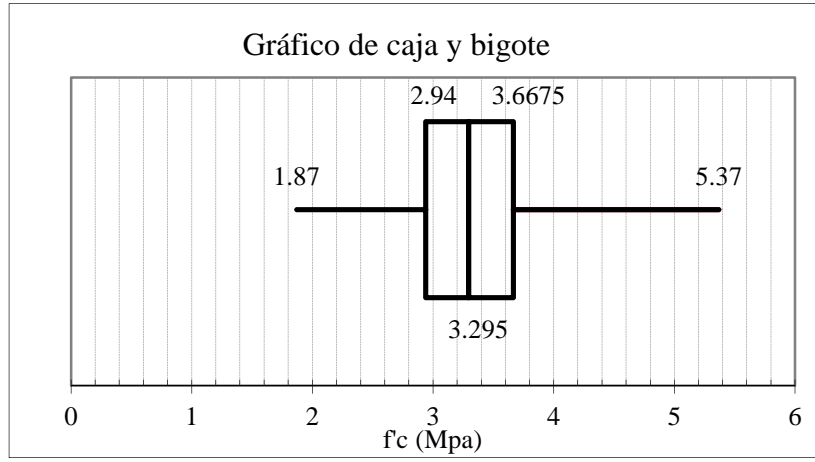
De la ilustración 4-1, se generaron los siguientes datos: Se obtuvo una cantidad de 16 datos, en los cuales su valor máximo fue de 5.37 Mpa y el menor de 0.73 Mpa (ver tabla 4-1), para tener un rango de 4.64 Mpa; El cuartil 1 se encuentra en 1.59 Mpa, el cuartil 2 se encuentra en 2.12 Mpa, el cuartil 3 se encuentra en 3.01 Mpa.

De la ilustración 4-2, se generaron los siguientes datos: Se obtuvo una cantidad de 14 datos, en los cuales su valor máximo fue de 5.37 Mpa y el menor de 1.87 Mpa (ver tabla 4-2), para tener un rango de 3.50 Mpa;

El cuartil 1 se encuentra en 2.94 Mpa, el cuartil 2 se encuentra en 3.29 Mpa, el cuartil 3 se encuentra en 3.66 Mpa.



**Ilustración 4-1 Diagrama de caja para partículas de 2mm**



**Ilustración 4-2 Diagrama de cajas y bigotes para partículas de 5mm**

Se evidencia la acumulación de datos para el diagrama de caja para partículas de 2mm el cual se encuentra entre el cuartil 1 y 2, lo que implica encontrar comúnmente bajos valores a la resistencia a la compresión ya que están comprendidos entre los 1.59 Mpa y 2.12 Mpa. Para los datos del diagrama de caja para partículas de 5 mm los valores son mayores frente a los de 2 mm, pues su acumulación de datos se refleja entre los cuartiles 1 y 2, pero con valores de 2.94 Mpa y 3.29 Mpa.

### 4.1. Ensayo de Compresión

El ensayo de compresión se realiza con el fin de conocer el esfuerzo  $\sigma_c$ , el cual es producto de la carga última a la que puede ser sometido un material, esta debe ser normal a la superficie del área de contacto. Este ensayo es ideal para conocer las propiedades de materiales frágiles como los bloques de cemento los cuales al ser cementantes presentan fallas súbitas y micro deformaciones las cuales pueden ser despreciables.

Los valores producto del ensayo se presentan a continuación:

**Tabla 4-1 Bloques con PET de 2mm de tamaño.**

(1) Ladrillo N°	(2) % Arena	(3) % PET	(4) Lectura Ultima KN	(5) Res. a compresión. Bruta (Mpa)
1 B1 1	60%	40%	53.45	2.07
1 B1 2	60%	40%	65.28	2.53
1 B1 3	60%	40%	18.86	0.73
2 B1 1	70%	30%	46.09	1.79
2 B1 2	70%	30%	41.82	1.62
2 B1 3	70%	30%	55.25	2.14
3 B1 1	80%	20%	86.61	3.36
3 B1 2	80%	20%	53.98	2.09
3 B1 3	80%	20%	28.41	1.1
7 B1 1	50%	50%	38.16	1.48
7 B1 2	50%	50%	36.62	1.42
8 B1 1	100%	0%	89.74	3.48
8 B1 2	100%	0%	138.59	5.37
B1 P 1	100%	0%	76.67	2.97
B1 P 2	100%	0%	80.12	3.11
B1 P 3	100%	0%	66.58	2.58

El largo y el ancho obedecen a dimensiones constantes iguales a 39.50 a 10.29 cm respectivamente arrojando un área de 257.96 cm<sup>2</sup>; así mismo se obtuvo los valores de la resistencia a la compresión a partir de la relación entre la lectura última y el área.

**Tabla 4-2 Bloques con PET de 5mm de tamaño**

(1) Ladrillo N°	(2) % Arena	(3) % PET	(4) Lectura Ultima KN	(5) Res. a compresión Bruta (Mpa)
4 BI 1	60%	40%	94.34	3.66
4 BI 2	60%	40%	94.55	3.67
4 BI 3	60%	40%	97.7	3.79
5 BI 1	70%	30%	67.59	2.62
5 BI 2	70%	30%	48.28	1.87
5 BI 3	70%	30%	75.62	2.93
6 BI 1	80%	20%	95.94	3.72
6 BI 2	80%	20%	77.16	2.99
6 BI 3	80%	20%	92.5	3.59
8 BI 1	100%	0%	89.74	3.48
8 BI 2	100%	0%	138.59	5.37
BI P 1	100%	0%	76.67	2.97
BI P 2	100%	0%	80.12	3.11
BI P 3	100%	0%	66.58	2.58

El largo y el ancho obedecen a dimensiones constantes iguales a 39.50 a 10.29 cm respectivamente arrojando un área de 257.96 cm<sup>2</sup>; así mismo se obtuvo los valores de la resistencia a la compresión a partir de la relación entre la lectura ultima y el área.

#### 4.1.1 Interpretación de las tablas 4-1 y 4-2

##### (1) Ladrillo N°

En la primera columna (1) se encuentra la clasificación que se utilizó según la cantidad de material empleado para las muestras, motivo por el cual se constituyó la siguiente nomenclatura: #, BI, # (Tipo de relación arena vs PET, Bloque, N° de muestra).

##### Relación Arena Vs PET (2mm)

#1 Arena 60%, PET 40%

#2 Arena 70%, PET 30%

#3 Arena 80%, PET 20%

**Relación Arena Vs PET (5mm)**

#4 Arena 60%, PET 40%

#5 Arena 70%, PET 30%

#6 Arena 80%, PET 20%

**Relación Arena Vs PET (2mm)**

#7 Arena 50%, PET 50%

**Bloques sin PET**

#8 Arena 100%, PET 0%

P Arena 100%, PET 0% (Obedecen a bloques pilote)

**(2) (3) % Arena y % PET**

Estas columnas (2 y 3) presentan las proporciones en las que se incluyó el PET, siempre haciendo un remplazo de la arena equivalente.

**(4) Lectura Última (KN)**

Presenta el valor de la carga normalmente distribuida sobre el espécimen con el cual falló, en unidades de Kilo Newton.

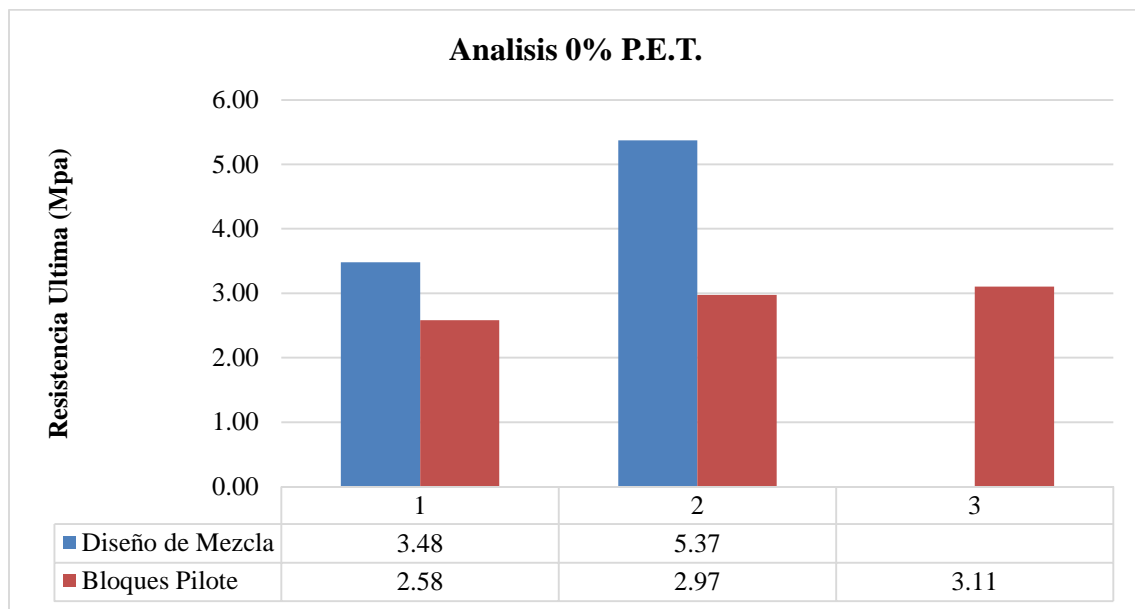
**(5) Resistencia a la Compresión Bruta, Mpa**

La resistencia a la compresión se mide en unidades de esfuerzos (Mpa), por lo cual es la relación inversamente proporcional de los valores obtenidos de la lectura de carga última (4) y el área bruta obtenida.

### 4.1.2 Análisis e Interpretación de los datos

#### El contenido 0% PET

El contenido de 0% PET se denominará en este documento como el análisis entre los valores arrojados por 2 bloques (8 Bl 1 & 8 Bl 2) generados con el diseño de mezcla presentado (ver tabla 3.10), comparados con 3 bloques (B Pl 1, B Pl 2 & B Pl 3) los cuales son productos del fabricante. El resultado fue el siguiente:



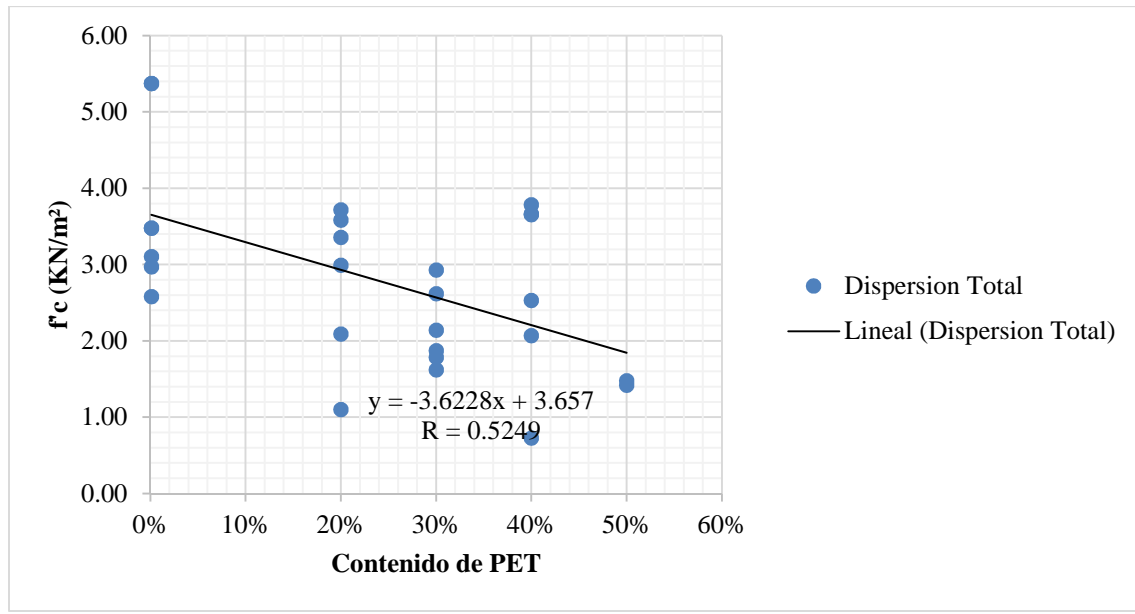
**Ilustración 4-3 Análisis 0% de PET**

Los bloques pilotes evidencian una menor resistencia frente al nuevo diseño de mezcla.

#### Adición de PET

Con el fin de analizar los estados de esfuerzos en el material mediante la introducción de PET se generó la ilustración 4-4, en la cual se presenta la Resistencia ultima ( $f'_c$ ) versus el contenido de PET en porcentaje, el cual trató de estimar su afinidad mediante correlaciones en las cuales se evidencia:  $R^2 = 0.2756$ , que al aplicarle la raíz cuadrada  $R = 0.5249$  el cual es un valor muy alejado del 1.0, no hay

dependencia directa bien sea creciente o decreciente entre el contenido de PET y la resistencia del material, por lo tanto se puede afirmar que existe incorrelación.



**Ilustración 4-4 Introducción de PET a los bloques**

#### **Bloques con presencia de PET de 2mm**

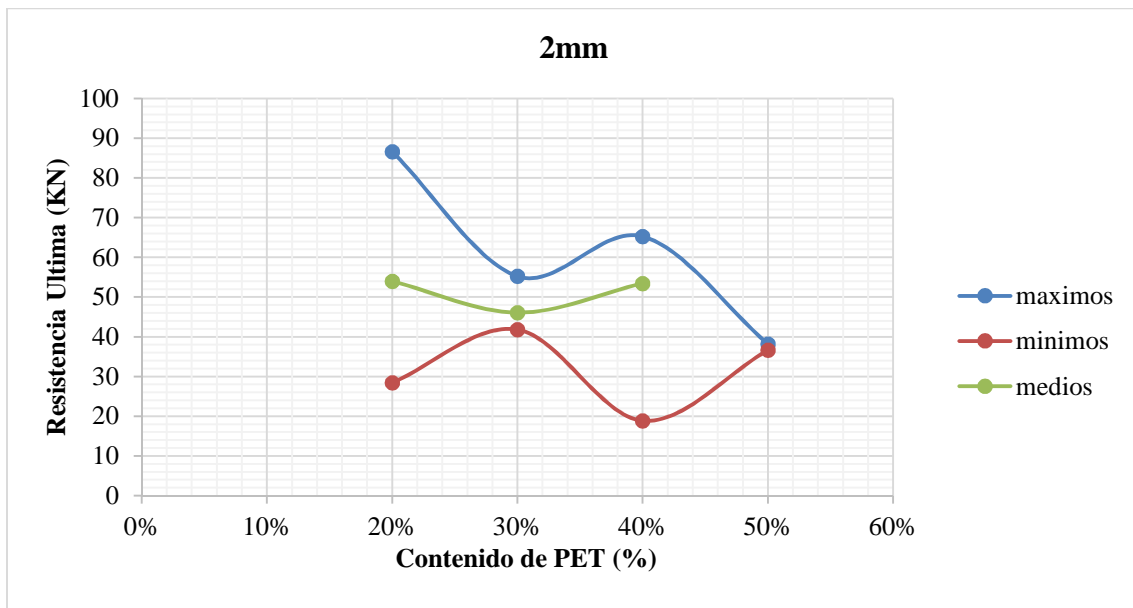
La implementación de partículas de PET de 2mm de tamaño aplicado en distintas proporciones genera una serie de datos los cuales no presentan alguna dependencia entre ellos, por esta razón se hace necesario seguir separando los datos en aquellos que se puedan comparar unos con otros, por este motivo se realizó un seguimiento a los valores máximos, medios y mínimos de cada resultado con el fin hallar una envolvente de falla para este material con cada uno de los porcentajes suministrados. Los resultados se encuentran organizados en la tabla 4-3.



**Tabla 4-3 Resultado de Cargas para bloque con PET de 2mm.**

Ladrillo N°	% Arena	% PET	Lectura Última KN (Max)	Lectura Última KN (medio)	Lectura Última KN (Min)
2 mm					
7 BL	50%	50%	38.16	N.A.	36.62
1 BL	60%	40%	65.28	53.45	18.86
2 BL	70%	30%	55.25	46.09	41.82
3 BL	80%	20%	86.61	53.98	28.41

La envolvente grafica se encuentra en la ilustración 4-5, en donde se generó una secuencia para los valores máximos, medios y mínimos. De dicha envolvente se puede considerar la estabilidad que le puede generar el PET a la resistencia a la compresión del bloque y un contenido óptimo para la utilización del material.



**Ilustración 4-5 Envolvente de falla para bloques con PET de 2mm**

La interpretación de la ilustración 4-5 perteneciente a la envolvente de falla, se sustenta mejor mediante el uso de modelos estadísticos como el coeficiente de variación los cuales generan una rata abierta a las comparaciones, el cual consiste en la relación que existe entre el promedio de los valores entre la desviación. En la tabla 4-4 se reflejan cada uno de los valores calculados para sus respectivos porcentajes,

de la cual se puede afirmar que entre mayor sea el valor, mayor será la variación. Por lo tanto cuando se emplean contenidos del 20% y del 40% se encuentran valores de 52% y 53% respectivamente, a pesar de que con el 20% de contenido de PET se encuentra registrado el mayor valor en cuanto a resistencia, siendo así un rango tan amplio en el proceso de producción que podría inducir a la creación de materiales ineficientes y grandes desperdicios lo cual lo hace poco efectivo; Los valores que presentan una medida más uniforme se centran en el contenido del 30% al 50% los cuales solo presentaron una medida del 14% y 3%, de aquí se descarta el 50% de contenido de PET pues todos sus valores fueron definitivamente inferiores a los de un contenido del 30%, haciendo un material ideal el contenido de 30% para bloques de PET de tamaño de 2 mm.

**Tabla 4-4 Coeficiente de variación para distintos contenidos de PET**

			Promedio		Varianza		Desviación		Coeficiente de Variación	
	Resistencia Última (KN)	Esfuerzo Último (MPa)	Resistencia Última (KN)	Esfuerzo Último (MPa)	Resistencia Última (KN)	Esfuerzo Último (MPa)	Resistencia Última (KN)	Esfuerzo Último (MPa)	Resistencia Última (KN)	Esfuerzo Último (MPa)
Contenido 20% PET (2mm):										
Máximos	86.61	3.36	56.33	2.18	850.96	1.28	29.17	1.13	52%	52%
Medios	53.98	2.09								
Mínimos	28.41	1.1								
Contenido 30% PET (2mm):										
Máximos	55.25	2.14	47.72	1.85	47.08	0.07	6.86	0.26	14%	14%
Medios	46.09	1.79								
Mínimos	41.82	1.62								
Contenido 40% PET (2mm):										
Máximos	65.28	2.53	45.86	1.78	581.87	0.87	24.12	0.94	53%	53%
Medios	53.45	2.07								
Mínimos	18.86	0.73								
Contenido 50% PET (2mm):										
Máximos	38.16	1.48	37.39	1.45	1.19	0.00	1.09	0.04	3%	3%
Mínimos	36.62	1.42								

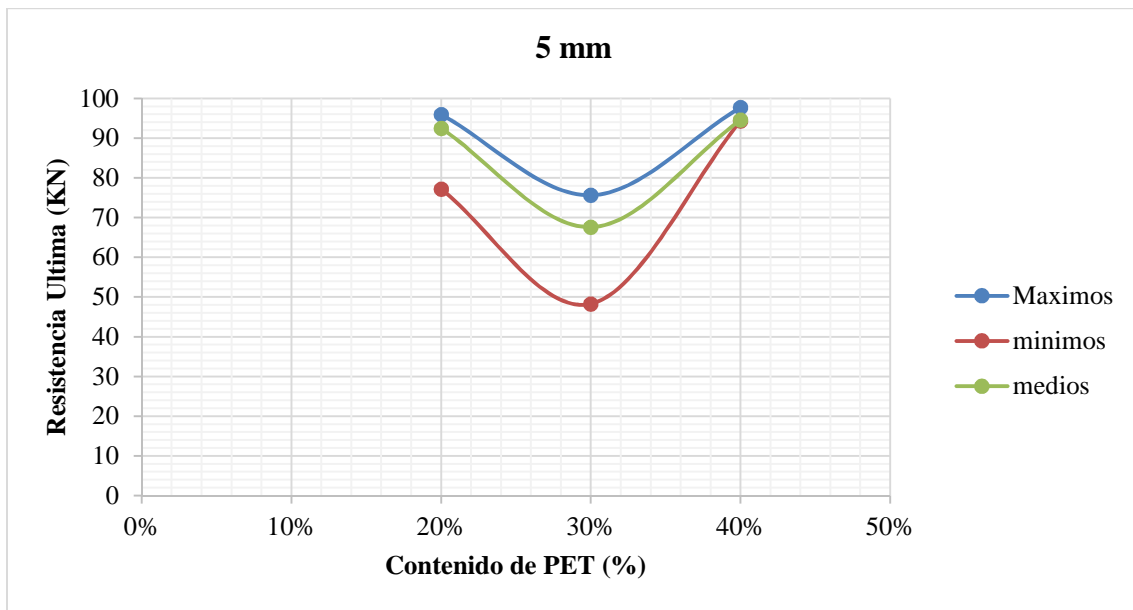
**Bloques con presencia de PET de 5mm**

La adición de partículas de 5mm ha generado, al contrario, comportamientos más predecibles pues cada uno de los valores que están en la tabla 4-5, agrupados de manera tal como máximos, medios y mínimos que mediante la ilustración 4-6 se evidencia su comportamiento parabólico abierto hacia arriba en todas las envolventes y con valores pico cuando se le adiciona un 40% de PET

Sin embargo, se utilizó nuevamente el modelo estadístico para la determinación de coeficientes de variación (ver tabla 4-6) con el objetivo de comparar cada uno de los resultados en cuanto a promedio y desviación lo cual puede dar una clara idea del contenido óptimo.

**Tabla 4-5 Resultado de cargas para bloque con PET de 5mm**

Ladrillo N°	% Arena	% PET	Lectura Última KN (Max)	Lectura Última KN (medio)	Lectura Última (KN) (Min)
5 mm					
4 BL	60%	40%	97.7	94.55	94.34
5 BL	70%	30%	75.62	67.59	48.28
6 BL	80%	20%	95.94	92.50	77.16
8 BL	100%	0%	138.59	N.A.	89.74



**Ilustración 4-6 Envoltente de falla para bloques con PET de 5 mm**

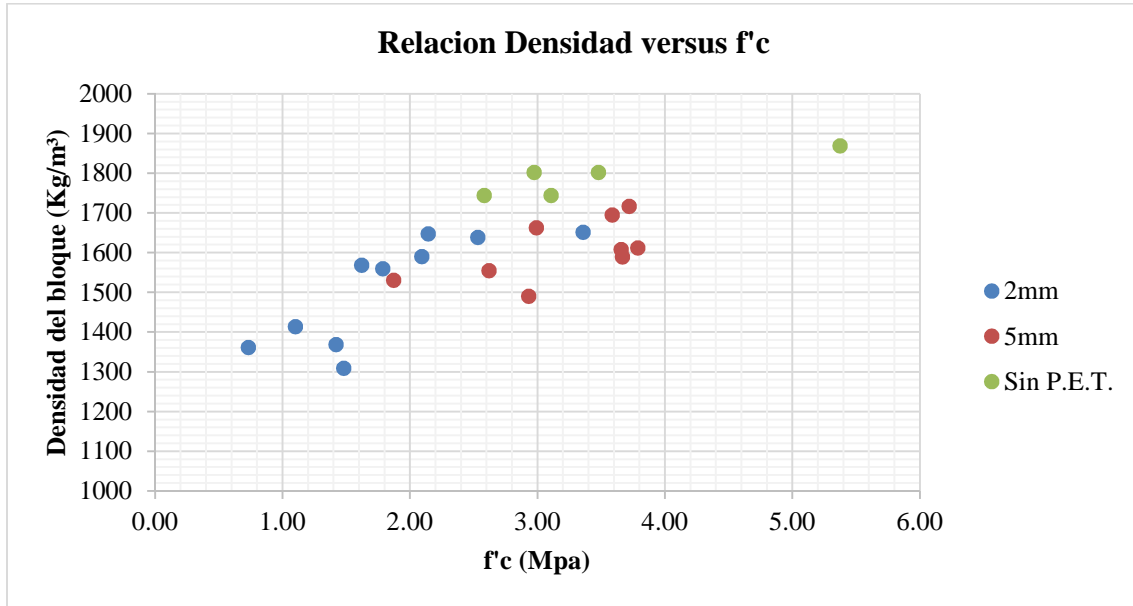
**Tabla 4-6 Coeficiente de variación para distintos contenidos de PET**

			Promedio		Varianza		Desviación		Coeficiente de variación	
	Resistencia Última (KN)	Esfuerzo Último (MPa)	Resistencia Última (KN)	Esfuerzo Último (MPa)	Resistencia Última (KN)	Esfuerzo Último (MPa)	Resistencia Última (KN)	Esfuerzo Último (MPa)	Resistencia Última (KN)	Esfuerzo Último (MPa)
<b>Contenido 20% PET (5mm):</b>										
Máximos	95.94	3.72								
Medios	92.5	3.59								
Mínimos	77.16	2.99								
			88.53	3.43	99.97	0.15	10.00	0.39	11%	11%
<b>Contenido 30% PET (5mm):</b>										
Máximos	75.62	2.93								
Medios	67.59	2.62								
Mínimos	48.28	1.87								
			63.83	2.47	197.47	0.30	14.05	0.55	22%	22%
<b>Contenido 40% PET (5mm):</b>										
Máximos	97.7	3.79								
Medios	94.55	3.67								
Mínimos	94.34	3.66								
			95.53	3.71	3.54	0.01	1.88	0.07	2.00%	2.00%

Es adecuado afirmar que el coeficiente de variación igual a 2% es una medida de fácil aceptación para el contenido de 40% de PET indicando su poca variabilidad y mejorando su fiabilidad, en cuanto a los resultados de compresión en los bloques de concreto.

**Relación entre la densidad del bloque y la resistencia a la compresión  $f'c$**

Se hace necesario evaluar si existe de alguna manera la influencia entre estas dos características aparentemente diferentes. La representación gráfica de la influencia entre los dos parámetros se encuentra en la ilustración 4-7 el cual se separa en 3 grupos: Los bloques con contenido de PET de 2 mm; Los bloques con contenido de PET de 5 mm; Los bloques sin contenido alguno de PET.



**Ilustración 4-7 Relación entre la densidad y la f'c**

Los resultados son claros y se distingue la relación directamente proporcional entre resistencia y densidad, entre más denso sea el material este tiene mejor comportamiento frente a la compresión. Con respecto al tamaño de las partículas de PET se puede concluir que: Las partículas de 2 mm presentan los valores frente a la resistencia más bajos, las densidades más bajas, 4 de sus bloques no se encuentran en el grupo de concretos normales y es prudente recordar que a mayor adición de PET de dicho tamaño se redujo la densidad del material; los bloques con contenido de 5 mm presentaron mejores resultados en la comparación entre f'c y densidad, pues los resultados por la inclusión de 20% y 40% igualaron los valores obtenidos con contenido 0% PET y adicionalmente en algunas muestras mejoraron las características adicionándole una mayor resistencia y reduciendo la densidad del bloque, lo que trae consigo un material más liviano que los tradicionales y de mejor calidad.

## 4.2. Ensayo de Flexión

Una de las pruebas realizadas fue el ensayo de flexión, el cual se aplicó a 16 muestras con distintos contenidos de PET a fin de conocer las afectaciones que puede tener la implementación del PET, el resumen de las muestras ensayadas se encuentra en la tabla 4-7 y tabla 4-8.

**Tabla 4-7 Bloques con PET de 2 mm de tamaño.**

Bloque N°	Arena (%)	PET (%)	Lectura ultima (KN)	Lectura ultima (Kg)	Peso Unidad (Kg)	Resistencia (Mpa)	Resistencia Kg/cm <sup>2</sup>
1 BI 1	60%	40%	2.58	263.20	7.307	0.10	1.02
1 BI 2	60%	40%	2.59	264.20	7.663	0.10	1.02
2 BI 1	70%	30%	3.14	320.30	8.155	0.12	1.24
2 BI 2	70%	30%	3.43	349.90	7.869	0.13	1.36
2 BI 3	70%	30%	3.69	376.40	8.335	0.14	1.46
3 BI 1	80%	20%	5.88	599.80	8.310	0.23	2.33
3 BI 2	80%	20%	6.25	637.50	8.787	0.24	2.47
8 BI 1	100%	0%	10.44	1064.90	9.446	0.40	4.13

El largo y el ancho obedecen a dimensiones constantes iguales a 39.50 a 10.29 cm respectivamente arrojando un área de 257.96 cm<sup>2</sup>; así mismo se obtuvo los valores de la resistencia a partir de la relación entre la lectura ultima y el área.

**Tabla 4-8 Bloques con PET de 5 mm de tamaño**

Bloque N°	Arena (%)	PET (%)	Lectura ultima (KN)	Lectura ultima (Kg)	Peso Unidad (Kg)	Resistencia (Mpa)	Resistencia Kg/cm <sup>2</sup>
7 BI 1	50%	50%	2.88	293.80	6.854	0.11	1.14
7 BI 2	50%	50%	3.35	341.70	7.371	0.13	1.32
4 BI 1	60%	40%	6.27	639.50	8.428	0.24	2.48
4 BI 2	60%	40%	7.20	734.40	8.605	0.28	2.85
5 BI 1	70%	30%	6.75	688.50	8.399	0.26	2.67
5 BI 2	70%	30%	4.70	479.40	8.161	0.18	1.86
6 BI 1	80%	20%	5.87	598.70	8.661	0.23	2.32
6 BI 2	80%	20%	7.21	735.40	9.127	0.28	2.85
8 BI 1	100%	0%	10.44	1064.90	9.446	0.40	4.13

El largo y el ancho obedecen a dimensiones constantes iguales a 39.50 a 10.29 cm respectivamente arrojando un área de 257.96 cm<sup>2</sup>; así mismo se obtuvo los valores de la resistencia a partir de la relación entre la lectura ultima y el área.

**Bloque N°**

En la primera columna (1) se encuentra la clasificación que se utilizó según la cantidad de material empleado para las muestras, motivo por el cual se constituyó la siguiente nomenclatura: #, B1, # (Tipo de relación arena vs PET, Bloque, N° de muestra).

**Relación Arena Vs PET (2mm)**

#1 Arena 60%, PET 40%

#2 Arena 70%, PET 30%

#3 Arena 80%, PET 20%

**Relación Arena Vs PET (5mm)**

#4 Arena 60%, PET 40%

#5 Arena 70%, PET 30%

#6 Arena 80%, PET 20%

**Relación Arena Vs PET (2mm)**

#7 Arena 50%, PET 50%

**Bloques sin PET**

#8 Arena 100%, PET 0%

P Arena 100%, PET 0% (Obedecen a bloques pilote)

**% Arena y % PET**

Estas columnas (2 y 3) presentan las proporciones en las que se incluyó el PET, siempre haciendo un remplazo de la arena equivalente.

**Lectura Última (KN)**

Presenta el valor de la carga normalmente distribuida sobre el espécimen con el cual falló, en unidades de Kilo Newton.

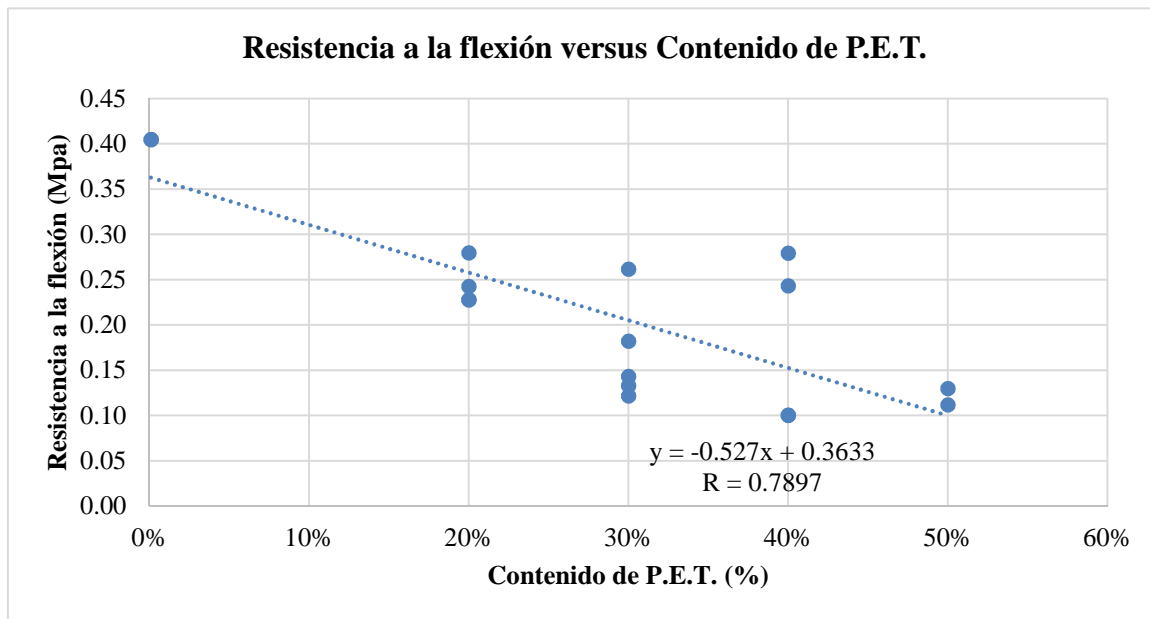


### Resistencia a la Flexión, (Mpa)

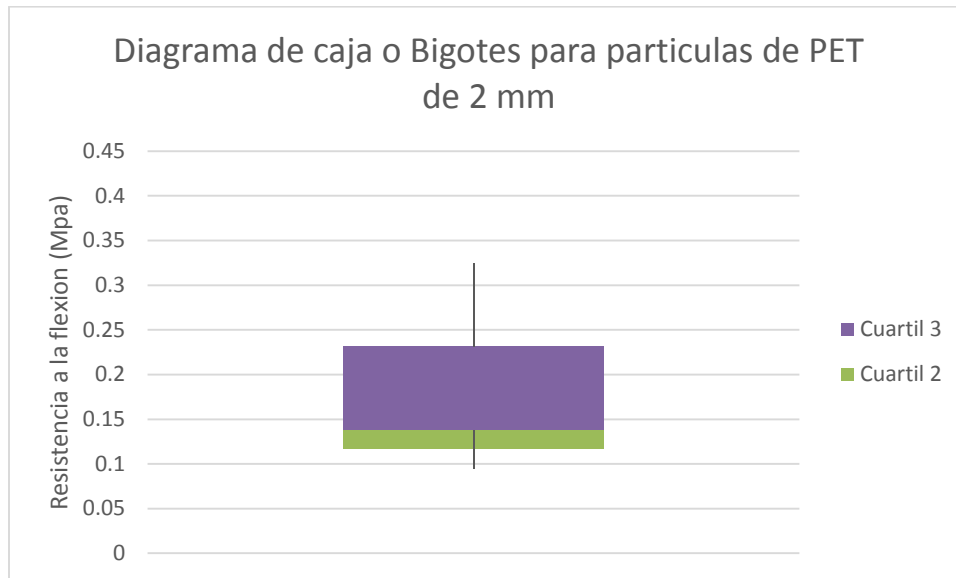
La resistencia a la flexión se mide en unidades de esfuerzos (Mpa), por lo cual es la relación inversamente proporcional de los valores obtenidos de la lectura de carga última (4) y el área bruta obtenida (7).

#### Efectos del PET a elementos que trabajan a flexión

Es cada vez más común el uso de aditamentos para mejorar las propiedades de los concretos y de los elementos construidos con él. En este capítulo se evaluarán las posibles ventajas o desventajas de la adición de PET en estado sólido a los bloques durante su proceso de fabricación.



**Ilustración 4-8** Introducción de PET a los bloques

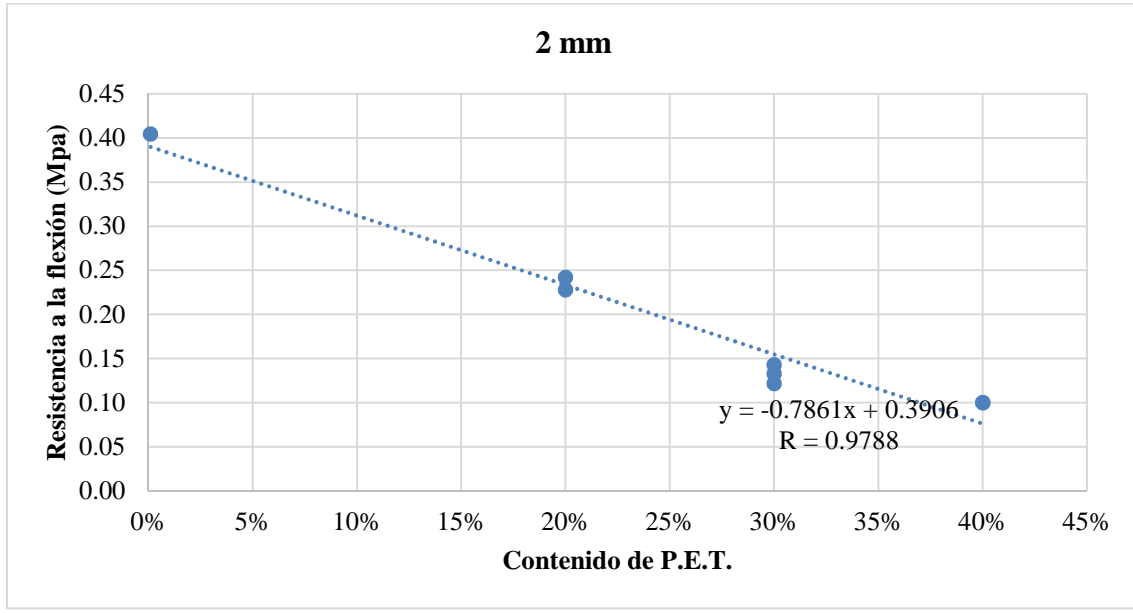


**Ilustración 4-9 Diagrama de cajas y bigotes para Resistencia a la Flexión en PET de 2 mm**

La ilustración 4-8, demuestra que mediante una ecuación lineal se puede obtener una correlación con tendencia negativa aplicada al total de los valores sin discriminar el tamaño del PET lo cual es notoriamente contradictorio a lo encontrado en los ensayos de compresión, anexo podemos ratificar la mejora que presenta el valor de  $R^2$  igual a 0.6237 y  $R = 0.7897$ . Además, es importante recalcar que la adición de PET genero una importante reducción en la capacidad de resistencia en términos de flexión, lo cual será analizado de manera discretizada en el siguiente subíndice, en donde se separan las variables según el tamaño del PET y su proporción adicionada

#### **Variación con la adición de partículas de 2 mm de PET**

La adición de PET de 2 mm de tamaño, ha generado un decremento en la capacidad de flexión del bloque tal como se presenta en la ilustración 4-10, en donde se reprodujo un modelo estadístico de dispersión que predice una correlación de  $R^2 = 0.9581$  y  $R = 0.9788$ , la cual se podría considerar como casi perfecta con una ecuación lineal e indica la estrecha relación entre la cantidad de PET y la disminución directamente proporcional de la resistencia.

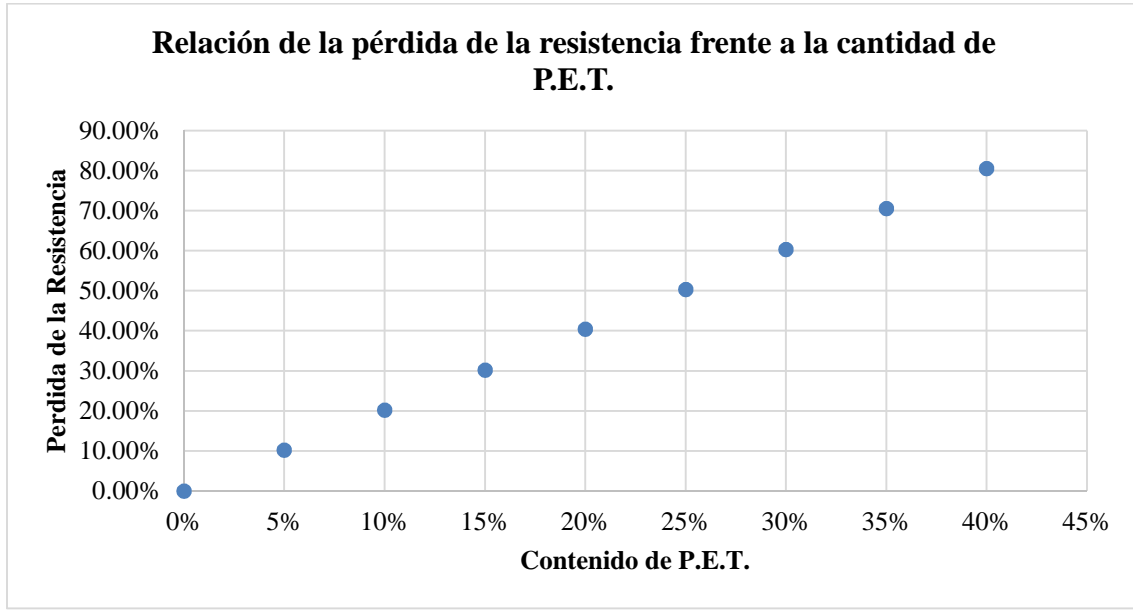


**Ilustración 4-10 Introducción de PET de 2 mm a los bloques.**

Dado el grado de correlación entre contenido de PET versus resistencia del material se aplicó la ecuación lineal que se encuentra en la ilustración 4-10, con el fin de determinar porcentualmente el valor de la pérdida de resistencia con respecto al estado de 0% PET tomado como referencia. Los resultados de la aplicación de la ecuación se presentan en la tabla 4-9, ilustración 4-11, en donde se evidencia la disminución progresiva de la resistencia a la flexión.

**Tabla 4-9 Ecuación del modelo de correlación  $y = -0.7861x + 0.3906$**

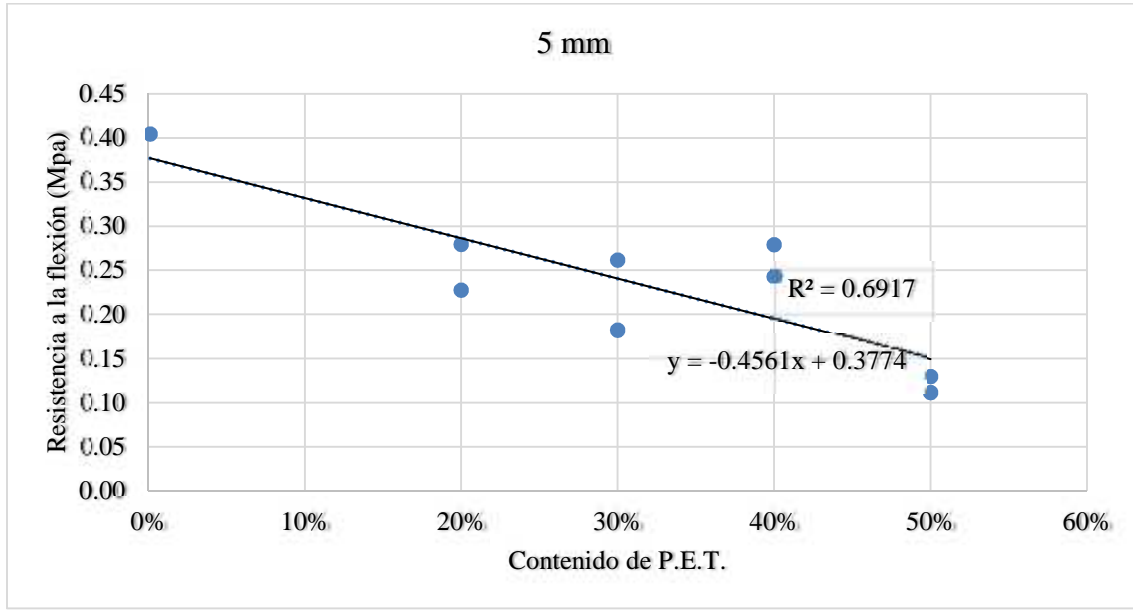
Contenido de PET (%)	Resistencia (Mpa)	Reducción de la resistencia (Con respecto al 0%)
0%	0.391	0.00%
5%	0.351	10.23%
10%	0.312	20.20%
15%	0.273	30.18%
20%	0.233	40.41%
25%	0.194	50.38%
30%	0.155	60.36%
35%	0.115	70.59%
40%	0.076	80.56%



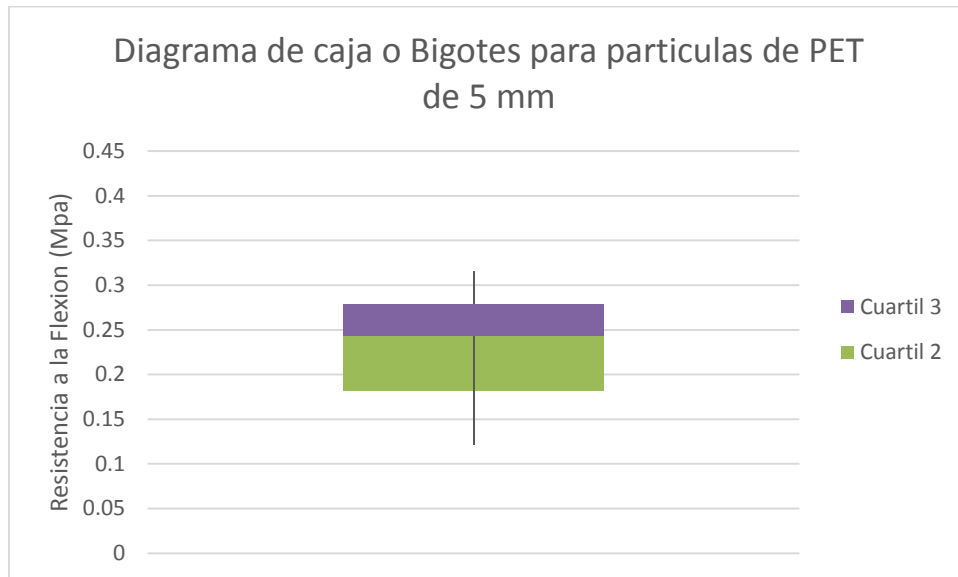
**Ilustración 4-11 Reducción de la resistencia a la flexión del bloque frente a la adición del contenido de PET de 2 mm**

#### **Variación con la adición de partículas de 5mm de PET**

Si bien la adición de PET en tamaños de 2 mm no fue algo que aportara resistencia al material en términos de flexión puesto que por el contrario le resta a sus propiedades, la adición de partículas de PET en 5 mm tampoco generó ningún cambio positivo en la misma medida. Pero sigue siendo importante realizar el análisis de la medida de la afectación con el objetivo de conocer que tan profundo resultó ser el daño a las características mecánicas del material y observar la relación que presenta en cuanto a la adición de PET versus la disminución de la resistencia a la flexión.



**Ilustración 4-12 Resistencia a la flexión versus adición de PET de tamaño 5mm**



**Ilustración 4-13 Diagrama de cajas y bigotes para Resistencia a la Flexión en PET de 5 mm**

La ilustración 4-12 presenta un modelo estadístico regido por una ecuación de cuarto grado que permite obtener una correlación entre el PET de tamaño 5 mm y adicionalmente puede tener un cierto grado de similitud a la envolvente de mediana y máxima falla en los ensayos de compresión para partículas de 2

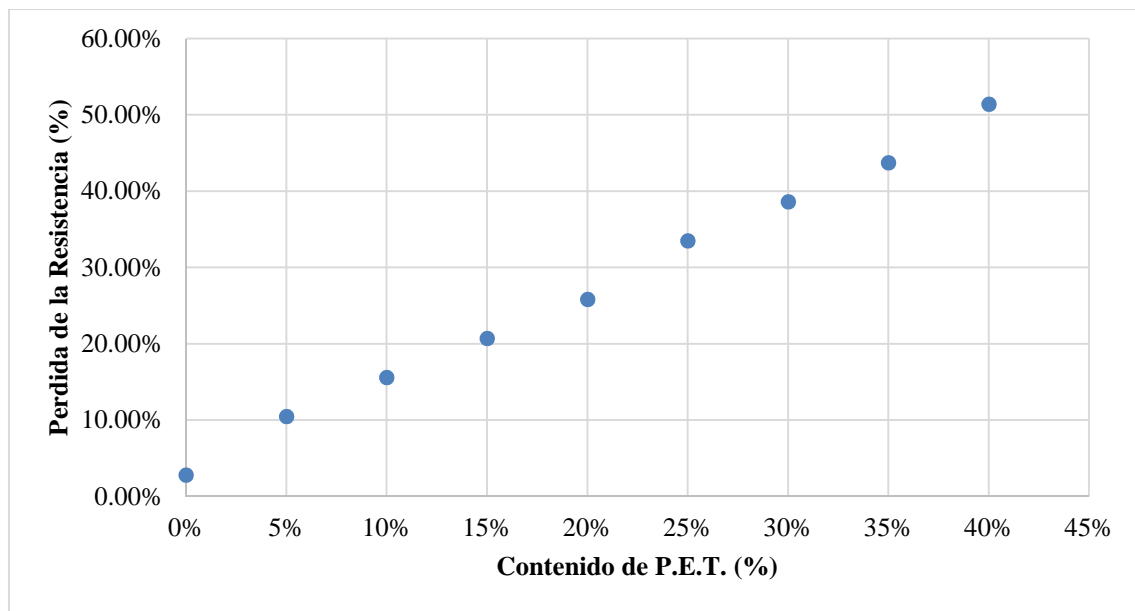
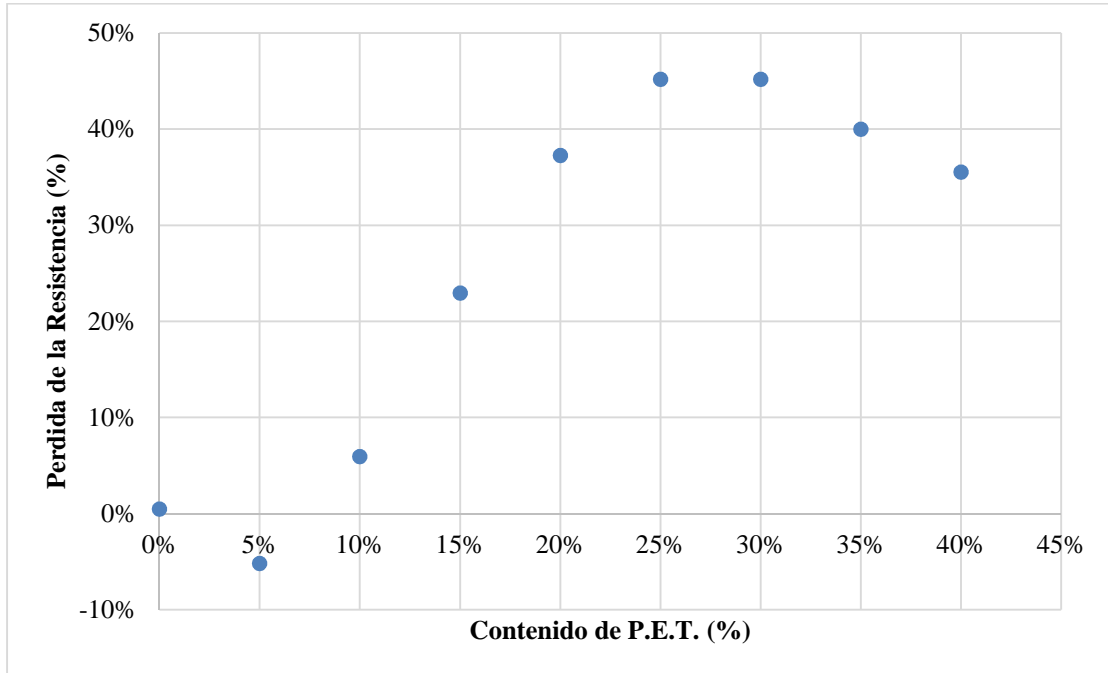
mm como se presenta en la ilustración 4-5, pero su comportamiento difiere en la buena cohesión que tienen las variables, pues en la determinación del  $R^2$  se arrojó un valor de 0.6917 y  $R = 0.8314$ , lo cual es bastante bueno ya que ayuda a predecir de manera más certera el comportamiento de la flexión del bloque con cualquiera que sea el porcentaje de adición. Se determinará a este modelo un valor de contenido óptimo el cual podrá ser confrontado con los demás ensayos realizados a los bloques, los valores arrojados están en la tabla 4-10.

**Tabla 4-10 Ecuación del modelo de correlación  $y = -0.4561x + 0.3774$**

Contenido de PET (%)	Resistencia (Mpa)	Reducción de la resistencia (Con respecto al 0%)
0%	0.38	2.81%
5%	0.35	10.49%
10%	0.33	15.60%
15%	0.31	20.72%
20%	0.29	25.83%
25%	0.26	33.50%
30%	0.24	38.62%
35%	0.22	43.73%
40%	0.19	51.41%

La tabla 4-10 presenta los valores típicos de resistencia a la flexión con adición de PET de 5 mm.

La adición de PET sigue restando propiedades al bloque de PET en cualquiera de los tamaños que se le adicione, sin embargo, el tamaño de la partícula influye en cuanto al valor de pérdida máximos de 80.56% para 2 mm (Ver tabla 4-9) y 51.41% para 5 mm (Ver tabla 4-10).

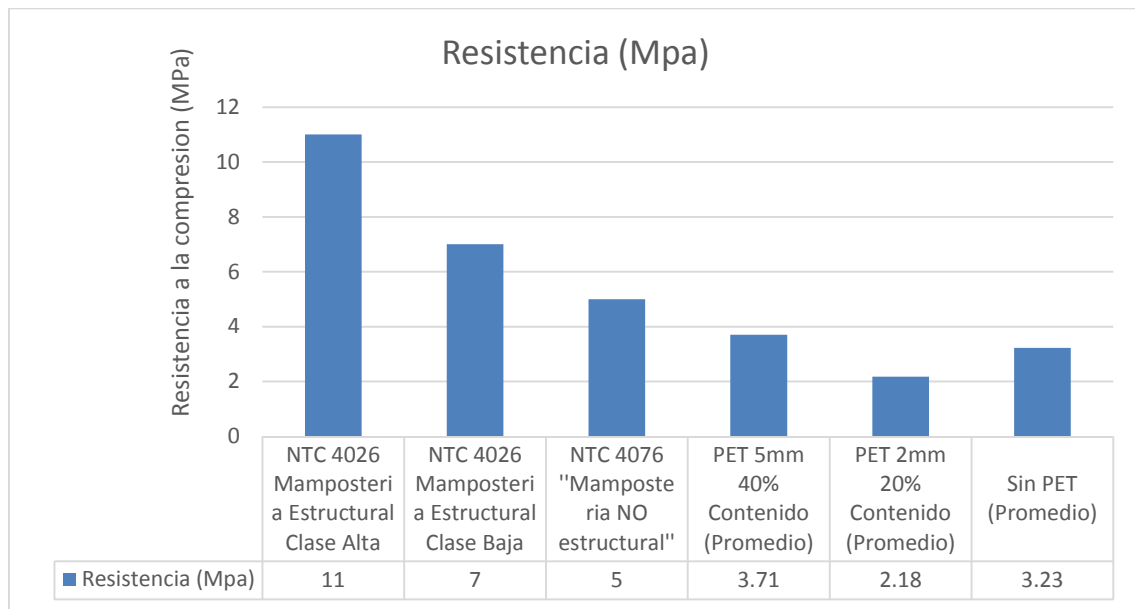


**Ilustración 4-14 Relación de la pérdida de resistencia frente a la cantidad de PET de 5 mm de tamaño.**

El contenido de 40% PET con partículas de tamaño de 5 mm en los boques en concreto sigue siendo la mejor opción incluso en los resultados de las pruebas a flexión, siendo el contenido que le genera menor reducción a la resistencia del material.

### Comparación de los resultados con la normativa colombiana

La comparación de datos parte de los valores estándares de las normativas NSR -10 que remiten a las NTC 4026 y 4076 (Titulo D, D.3.6.2.1 “Unidades de Concreto para mampostería”), estos se comparan con los valores obtenidos por los mejores resultados de la adición de 2 mm (promedio de 20% de contenido), 5 mm (promedio de 40% de contenido) y sin adición de PET (para la obtención del promedio solo se tuvieron en cuenta los valores de 2.97 y 3.48, excluyendo a 5.37 pues es un valor aislado que no representa el comportamiento general del material).



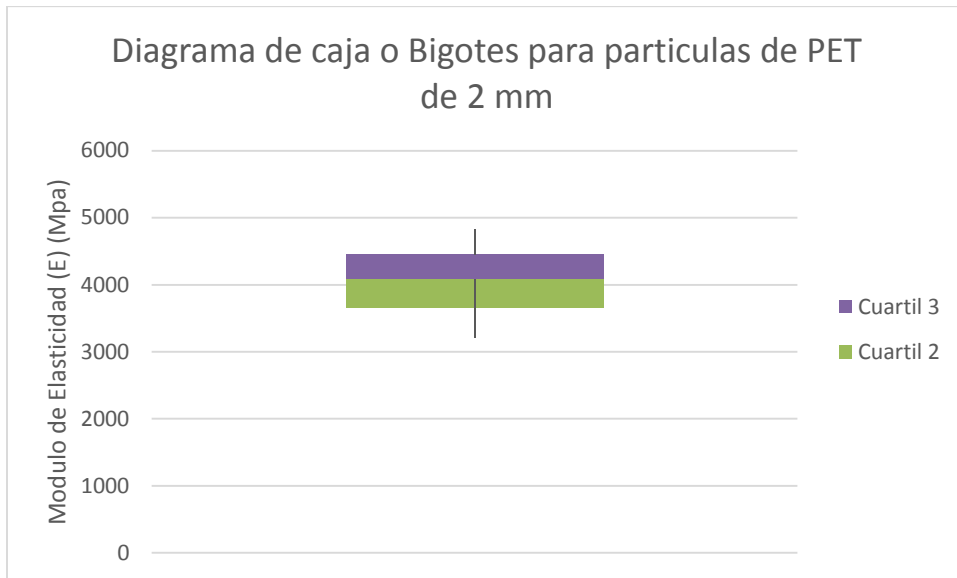
**Ilustración 4-15 Comparación de las resistencias bajo valores normativos.**

### 4.3. Módulo de Elasticidad

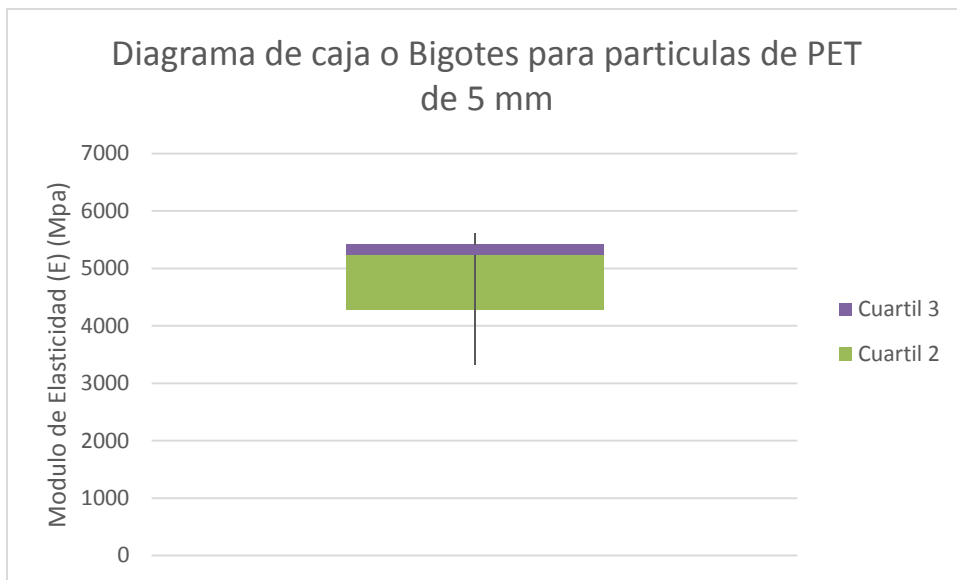
El módulo de elasticidad en materiales frágiles como el concreto es una tarea tediosa, pues las deformaciones se presentan en micro décimas de centímetros y cuando se presenta alguna deformación significativamente medible ocurre la falla en cuestión de segundos.



De los bloques se puede determinar que es un material frágil pues la carga aumenta de manera constante hasta llevarlo a su máximo esfuerzo, a partir de este punto se pierden todas las propiedades de resistencia.



**Ilustración 4-16 Diagrama de cajas y bigotes para Módulo de Elasticidad en bloques con PET de 2mm**



**Ilustración 4-17 Diagrama de cajas y bigotes para Módulo de elasticidad en bloques con PET de 5mm**

Debido a que no fue posible obtener las deformaciones durante los ensayos se hace imposible conseguir un módulo experimental, sin embargo la norma sismo resistente colombiana NSR – 10, en el capítulo C, apartado C.8.5.1; nos permite tomar como curva de diseño el modelo  $w_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f'c}$  en el cual  $w_c$  es la densidad del material en  $K / m^3$ , esta ecuación solo aplica para densidades entre el rango de 1440 y 2560. Motivo por el cual debieron ser evaluados cada uno de los parámetros que influyen en el cambio del módulo de elasticidad de las muestras ensayadas y aquellas que no cumplieran con el requisito no se tuvieron en cuenta a la hora de la modelación de datos en la curva de dispersión, los valores resumen se encuentran en la tabla 4-11.

Antes de ser discriminados dichos valores se puede realizar un análisis con respecto a la afectación que trae la implementación del PET en cuanto a la variabilidad a la densidad del bloque.

**Tabla 4-11 Densidad de bloques de concreto con presencia de PET 2mm.**

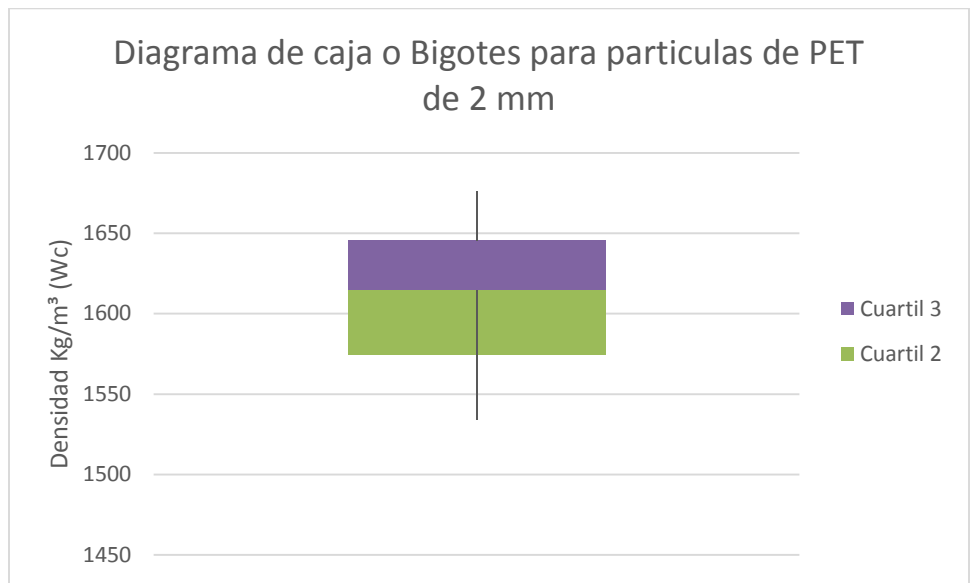
Ladrillo N°	% Arena	% PET	Peso Unidad Kg	Densidad Kg/m³
1 B1 1	60%	40%		
1 B1 2	60%	40%	8.455	1638.85
1 B1 3	60%	40%	7.025	1361.67
2 B1 1	70%	30%	8.047	1559.77
2 B1 2	70%	30%	8.095	1569.07
2 B1 3	70%	30%	8.5	1647.57
3 B1 1	80%	20%	8.521	1651.64
3 B1 2	80%	20%	8.205	1590.39
3 B1 3	80%	20%	7.295	1414.01

El largo, el ancho y la altura obedecen a dimensiones constantes iguales a 39.50, 10.29 y 20 cm respectivamente, a las cuales se les descontó por las celdas vacías (5.5cm x 13.5cm x 20cm x 2Und) arrojando un volumen de 5159 cm³; así mismo se obtuvo los valores de la densidad a partir de la relación entre la masa y el volumen.

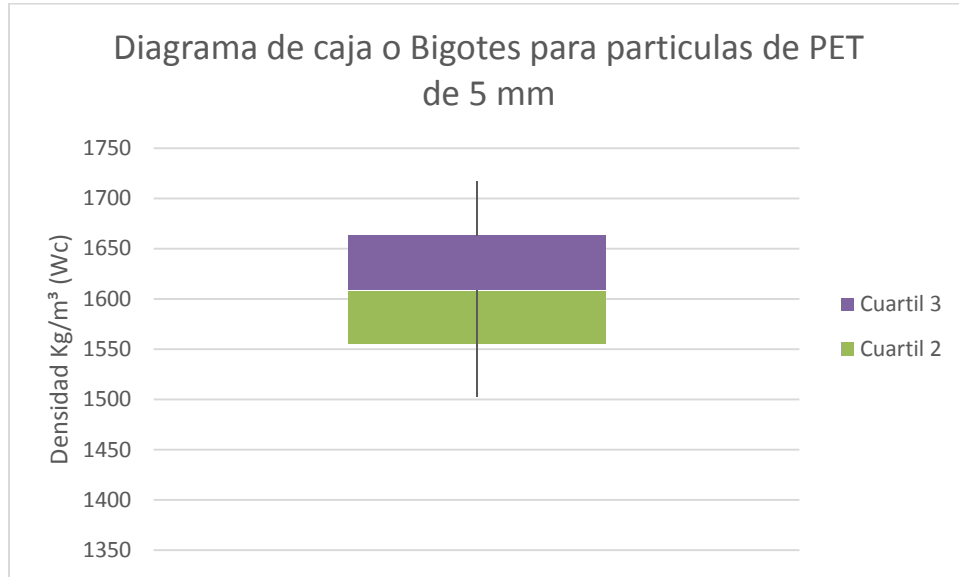
**Tabla 4-12 Densidad de bloques de concreto con presencia de PET 5mm**

Ladrillo N°	% Arena	% PET	Peso Unidad Kg	Densidad Kg/m <sup>3</sup>
4 Bl 1	60%	40%	8.298	1608.42
4 Bl 2	60%	40%	8.202	1589.81
4 Bl 3	60%	40%	8.316	1611.91
5 Bl 1	70%	30%	8.024	1555.31
5 Bl 2	70%	30%	7.899	1531.08
5 Bl 3	70%	30%	7.692	1490.96
6 Bl 1	80%	20%	8.859	1717.16
6 Bl 2	80%	20%	8.579	1662.89
6 Bl 3	80%	20%	8.746	1695.26
7 Bl 1	50%	50%	6.755	1309.34
7 Bl 2	50%	50%	7.061	1368.65
8 Bl 1	100%	0%	9.299	1802.45
8 Bl 2	100%	0%	9.643	1869.12
Bl P 1	100%	0%	9.299	1802.45
Bl P 2	100%	0%	9	1744.49
Bl P 3	100%	0%	9	1744.49

El largo, el ancho y la altura obedecen a dimensiones constantes iguales a 39.50, 10.29 y 20 cm respectivamente, a las cuales se les descontó por las celdas vacías (5.5cm x 13.5cm x 20cm x 2Und) arrojando un volumen de 5159 cm<sup>3</sup>; así mismo se obtuvo los valores de la densidad a partir de la relación entre la masa y el volumen.

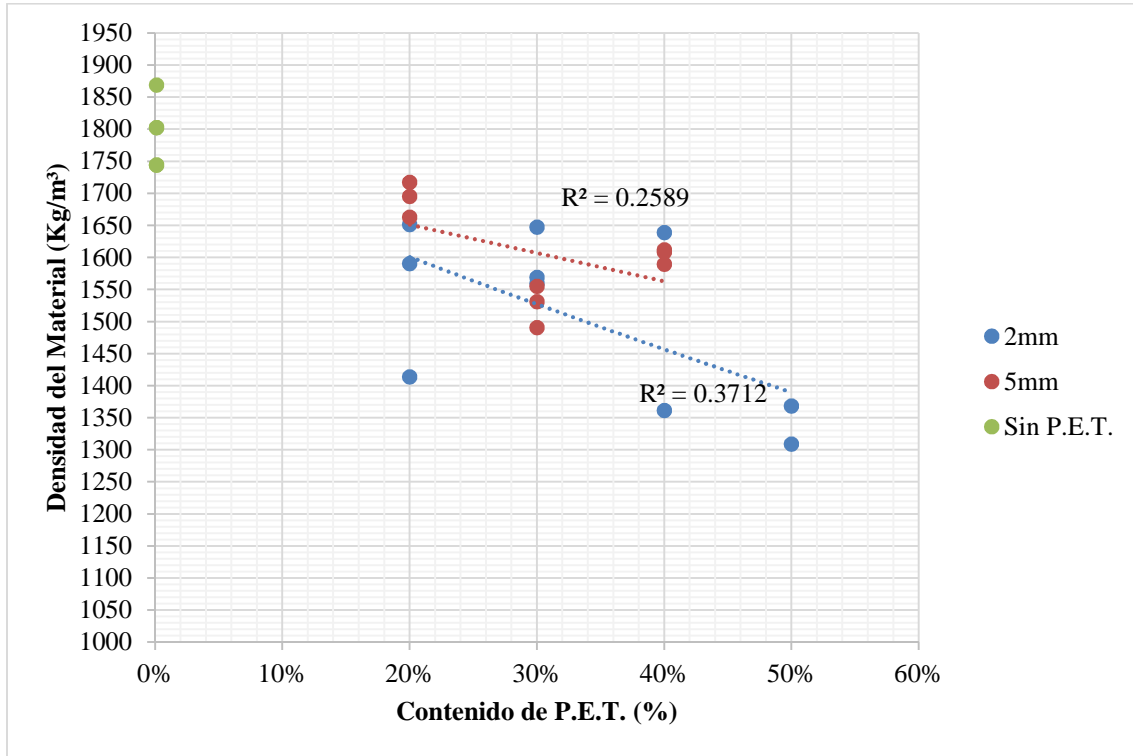


**Ilustración 4-18 Diagrama de cajas y bigotes para Densidad de bloques con PET de 2 mm**



**Ilustración 4-19 Diagrama de cajas y bigotes para Densidad en bloques con PET de 5 mm**

Los valores de la anterior tabla se expresan de manera gráfica en la ilustración 4-20 que presenta discretizados según el tamaño de la partícula de PET, el tipo de relación entre el contenido de PET y una línea amarilla que detecta los valores por debajo de los 1440 kg/m<sup>3</sup>.



**Ilustración 4-20 Relación entre el contenido de PET y la densidad del bloque.**

Al aumentar la cantidad de PET de partículas de 2 mm de tamaño es muy probable que incrementó al adicionarle un 30% pero a partir de ahí tiende a disminuir su densidad, es decir a grandes proporciones de PET de 2 mm el bloque es más liviano así mismo se puede determinar que al tener valores tan abiertos en cuanto a su densidad se considera como inestable su respuesta, con el inconveniente de que existe la posibilidad de presentar densidades inferiores a los 1440kg/m<sup>3</sup> perdiendo la característica de ser un concreto de ‘‘densidad normal’’.

En cuanto al uso de partículas de 5 mm induce a una parábola abierta hacia arriba la cual determina una condición opuesta a las partículas de 2 mm en donde los extremos de la función indican un aumento exponencial de la densidad del bloque.

Es claro que ha todo esto se le puede añadir que la adición de PET disminuye la densidad del material, presentándonos nuevos materiales livianos para la construcción con referencia a los tradicionales.

Producto de la depuración de datos de la tabla 4-11 y 4-12 que no cumplían con las especificaciones técnicas requeridas por la NSR -10 se presenta la tabla 4-13 y 4-14 en donde se utilizó el modelo  $w_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f'_c}$  a concretos normales. Los valores resultantes se aplicarán en una dispersión para la cual entregara como resultado el uso de dos parámetros en el modelo matemático frente a la respuesta por compresión, estos se pueden apreciar en la ilustración 4-21.

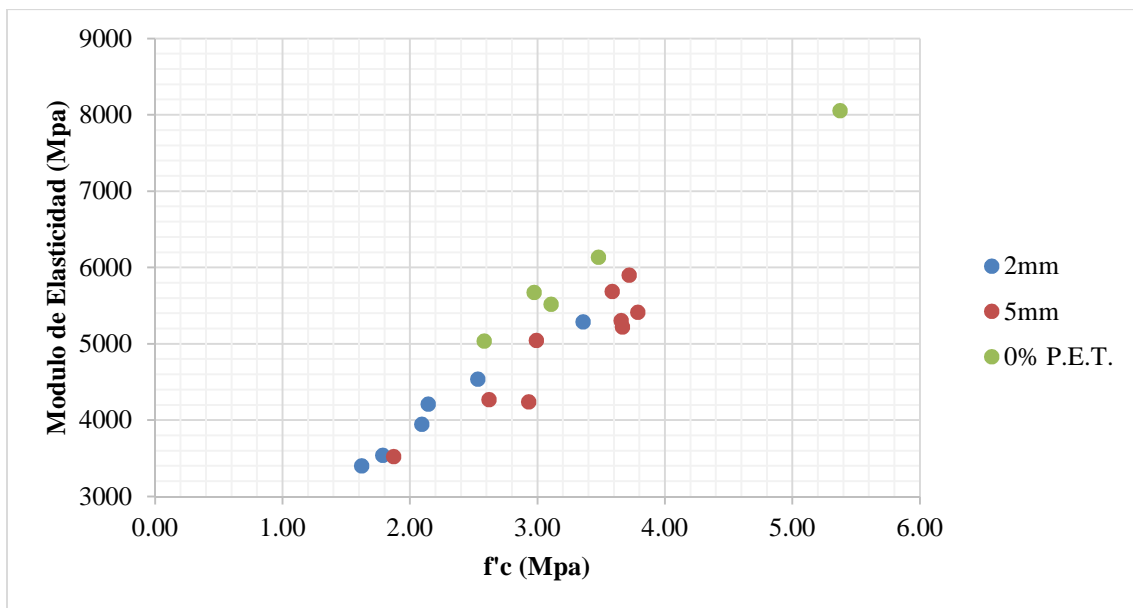
**Tabla 4-13 Valores para el módulo de elasticidad en bloques de concreto de densidad normal con PET 2 mm.**

Ladrillo N°	% Arena	% PET	Densidad Kg/m <sup>3</sup> (Wc)	Wc <sup>1'</sup>	f'c	Módulo de Elasticidad (E) (Mpa)
1 Bl 2	60%	40%	1638.85	66345.20	1.59	4538.87
2 Bl 1	70%	30%	1559.77	61601.33	1.34	3541.52
2 Bl 2	70%	30%	1569.07	62153.32	1.27	3402.21
2 Bl 3	70%	30%	1647.57	66875.57	1.46	4209.95
3 Bl 1	80%	20%	1651.65	67123.55	1.83	5287.72
3 Bl 2	80%	20%	1590.39	63424.49	1.45	3946.33

**Tabla 4-14 Valores para el módulo de elasticidad en bloques de concreto de densidad normal con PET 5 mm.**

Ladrillo N°	% Arena	% PET	Densidad Kg/m³ (Wc)	Wc¹'	f'c	Módulo de Elasticidad (E) (Mpa)
4 Bl 1	60%	40%	1608.42	64505.87	1.91	5303.41
4 Bl 2	60%	40%	1589.81	63389.71	1.92	5219.83
4 Bl 3	60%	40%	1611.91	64715.87	1.95	5415.29
5 Bl 1	70%	30%	1555.31	61337.41	1.62	4270.13
5 Bl 2	70%	30%	1531.08	59909.72	1.37	3524.13
5 Bl 3	70%	30%	1490.96	57570.23	1.71	4238.09
6 Bl 1	80%	20%	1717.16	71156.76	1.93	5902.24
6 Bl 2	80%	20%	1662.89	67810.05	1.73	5044.39
6 Bl 3	80%	20%	1695.26	69799.66	1.89	5684.62
8 Bl 1	100%	0%	1802.45	76523.26	1.87	6136.78
8 Bl 2	100%	0%	1869.12	80808.55	2.32	8054.51
Bl P 1	100%	0%	1802.45	76523.26	1.72	5672.82
Bl P 2	100%	0%	1744.49	72862.30	1.76	5520.48
Bl P 3	100%	0%	1744.49	72862.30	1.61	5034.86

La relación directamente proporcional se hace obvia, pues la abscisa del módulo de elasticidad es el resultado de una ecuación que incluye la ordenada del f'c.



**Ilustración 4-21 Aplicación del modelo  $E=w_c^{1.5} * 0.043 (f'c)$**

Pero la principal conclusión que permite detectar es que la resistencia a la compresión no es un factor que concluyente, puesto que en los bloques con PET de 5 mm que presentaron mejores resultados en compresión frente a los de 0%, no obtuvieron los mejores módulos de elasticidad, es decir que el parámetro que rige el módulo de elasticidad con este modelo matemático es la densidad del bloque. El ejemplo claro de dicha afirmación está en dos bloques con PET de 5 mm y uno sin PET que tienen aproximadamente 3 Mpa de resistencia a la compresión, pero estos tienen densidades en ese mismo orden de 1.490,96, 1662,89, y 1802,45 siendo el más alto para el bloque sin PET, en donde con el mismo  $f^c$  el bloque sin PET adquirió más de 600 Mpa con respecto a la muestra que le seguía y a la última le difirió en más de 2000 Mpa, esto solo teniendo como variable la densidad del bloque.

#### **4.4. Ensayo de Absorción de agua**

El capítulo de análisis de absorción en un bloque nos permite determinar la permeabilidad y el contenido de agua, esto nos llevara a entender que tipo de bloques podrán resistir mejor frente a patologías como las eflorescencias y las criptoflorescencias, los resúmenes de los resultados se presentan en la tabla 4-13.



**Tabla 4-15 Valores para el contenido de humedad de bloques de concreto con PET.**

Ladrillo N°	% PET	Peso Húmedo (gr)	Peso Seco (gr)	Densidad del concreto secado en horno	% Humedad	Agua absorbida por volumen	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
<b>2mm</b>							
1	40%	7,025.00	6,225.00	1237.57	12.85%	29.60%	13.36
1	40%	8,400.00	8,074.00	1605.17	4.04%	14.70%	15.98
1	40%	8,312.00	7,037.00	1399.01	18.12%	17.10%	15.81
1	40%	7,663.00	7,391.00	1469.38	3.68%	16.90%	14.58
1	40%	8,455.00	8,118.00	1613.92	4.15%	13.70%	16.09
1	40%	9,884.00	6,715.00	1334.99	32.06%	20.10%	18.80
1	40%	8,505.00	8,263.00	1642.74	2.93%	14.20%	16.18
1	40%	7,307.00	7,128.00	1417.10	2.51%	16.90%	13.90
2	30%	8,105.00	7,875.00	1565.61	2.92%	16.30%	15.42
2	30%	8,500.00	8,055.00	1601.39	5.52%	15.90%	16.17
2	30%	8,155.00	7,972.00	1584.89	2.30%	14.90%	15.51
2	30%	8,161.00	7,935.00	1577.53	2.85%	15.60%	15.53
2	30%	8,095.00	7,720.00	1534.79	4.86%	16.60%	15.40
2	30%	7,869.00	7,655.00	1521.87	2.80%	15.30%	14.97
2	30%	8,047.00	7,735.00	1537.77	4.03%	27.90%	15.31
2	30%	8,335.00	8,126.00	1615.51	2.57%	15.20%	15.86
3	20%	8,521.00	8,241.00	1638.37	3.40%	13.40%	16.21
3	20%	8,205.00	7,986.00	1587.67	2.74%	14.10%	15.61
3	20%	7,295.00	7,107.00	1412.92	2.65%	16.80%	13.88
3	20%	8,424.00	8,116.00	1613.52	3.79%	13.30%	16.03
3	20%	8,787.00	8,490.00	1687.87	3.50%	12.90%	16.72
3	20%	8,310.00	8,092.00	1608.75	2.69%	14.30%	15.81
3	20%	9,661.00	6,770.00	1345.92	29.92%	16.60%	18.38
7	50%	6,954.00	6,751.00	1342.15	3.01%	14.50%	13.23
7	50%	6,963.00	6,755.00	1342.94	3.08%	14.10%	13.25
7	50%	7,371.00	7,092.00	1409.94	3.93%	14.70%	14.02
7	50%	7,061.00	6,833.00	1358.45	3.34%	14.10%	13.43
<b>Sin PET</b>							
8	0%	9,446.00	9,192.00	1827.44	2.76%	8.60%	17.97
8	0%	9,335.00	9,034.00	1796.02	3.33%	8.90%	17.76
8	0%	9,643.00	9,308.00	1850.50	3.60%	9.00%	18.35
8	0%	9,299.00	9,050.00	1799.20	2.75%	8.70%	17.69
<b>5mm</b>							
4	40%	8,204.00	7,795.00	1549.70	5.25%	12.70%	15.61
4	40%	8,605.00	8,266.00	1643.34	4.10%	11.70%	16.37
4	40%	8,428.00	8,016.00	1593.64	5.14%	12.50%	16.03
4	40%	8,628.00	8,034.00	1597.22	7.39%	12.80%	16.41
4	40%	8,202.00	7,916.00	1573.76	3.61%	12.50%	15.60

4	40%	8,316.00	7,856.00	1561.83	5.86%	12.00%	15.82
4	40%	8,166.00	7,852.00	1561.03	4.00%	12.90%	15.54
4	40%	8,453.00	7,983.00	1587.08	5.89%	12.10%	16.08
5	30%	8,180.00	7,905.00	1571.57	3.48%	11.80%	15.56
5	30%	8,448.00	8,264.00	1642.94	2.23%	11.70%	16.07
5	30%	9,161.00	7,321.00	1455.47	20.08%	21.40%	17.43
5	30%	7,835.00	7,681.00	1527.04	2.00%	4.00%	14.91
5	30%	8,264.00	8,232.00	1636.58	0.39%	2.60%	15.72
5	30%	7,835.00	7,831.00	1556.86	0.05%	9.90%	14.91
5	30%	8,180.00	7,905.00	1571.57	3.48%	11.90%	15.56
5	30%	7,835.00	7,831.00	1556.86	0.05%	9.90%	14.91
6	20%	8,746.00	8,453.00	1680.52	3.47%	14.10%	16.64
6	20%	8,579.00	8,292.00	1648.51	3.46%	12.20%	16.32
6	20%	9,127.00	8,816.00	1752.68	3.53%	11.30%	17.36
6	20%	8,859.00	8,622.00	1714.12	2.75%	11.80%	16.85
6	20%	8,507.00	8,121.00	1614.51	4.75%	12.40%	16.18
6	20%	8,661.00	8,421.00	1674.16	2.85%	11.90%	16.48
6	20%	8,945.00	8,672.00	1724.06	3.15%	9.20%	17.02
6	20%	8,763.00	8,448.00	1679.52	3.73%	16.10%	16.67

El largo, el ancho y la altura obedecen a dimensiones constantes iguales a 39.50, 10.29 y 20 cm respectivamente, a las cuales se les descontó por las celdas vacías (5.5 cm x 13.5 cm x 20 cm x 2 Und) arrojando un volumen de 5159 cm<sup>3</sup>; así mismo se obtuvo los valores de la densidad a partir de la relación entre la masa y el volumen.

El primer modelo estadístico de tendencia central generado será la mediana, incentivada por la presencia de algunos pocos valores para la humedad y la permeabilidad muy alejados de los valores usuales en otros bloques, y que no representan un comportamiento real del material, pues puede ser producto de errores durante el ensayo o en el propio muestreo, dado el caso la medida que mejor se ajusta a esta necesidad es la mediana (ver tabla 4-16 y 4-17).

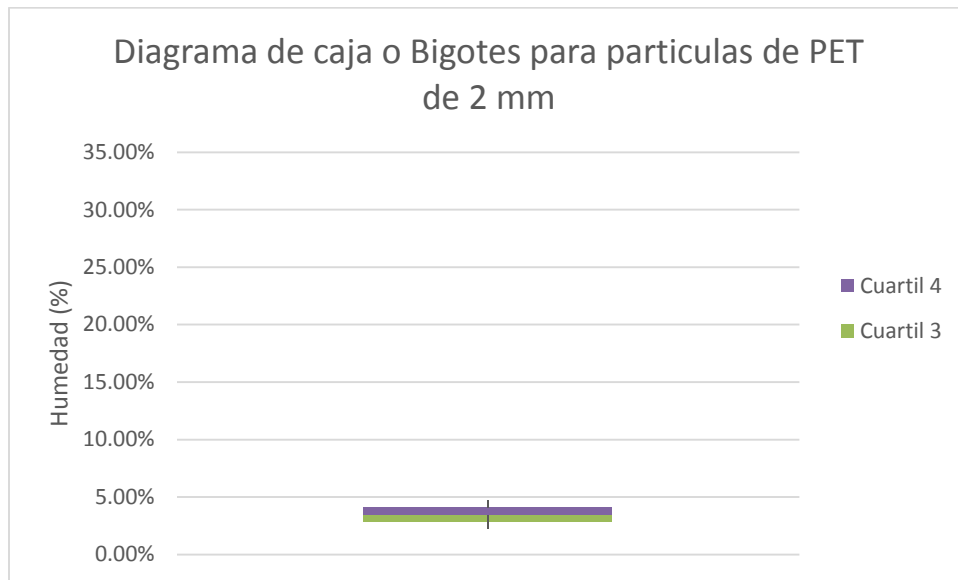
**Tabla 4-16 Valores para el contenido de humedad en bloques de concreto con PET**

	Máximo	Mínimo	Rango	Promedio humedad	Mediana humedad
<b>2mm</b>					
50%	3.93%	3.01%	0.92%	3.34%	3.21%
40%	32.06%	2.51%	29.55%	10.04%	4.10%
30%	5.52%	2.30%	3.22%	3.48%	2.89%
20%	29.92%	2.65%	27.27%	6.96%	3.40%
<b>5mm</b>					
40%	7.39%	3.61%	3.78%	5.16%	5.20%
30%	20.08%	0.05%	20.03%	3.97%	2.12%
20%	4.75%	2.75%	2.00%	3.46%	3.47%
<b>Sin PET</b>					
0%	3.60%	2.75%	0.85%	3.11%	3.05%

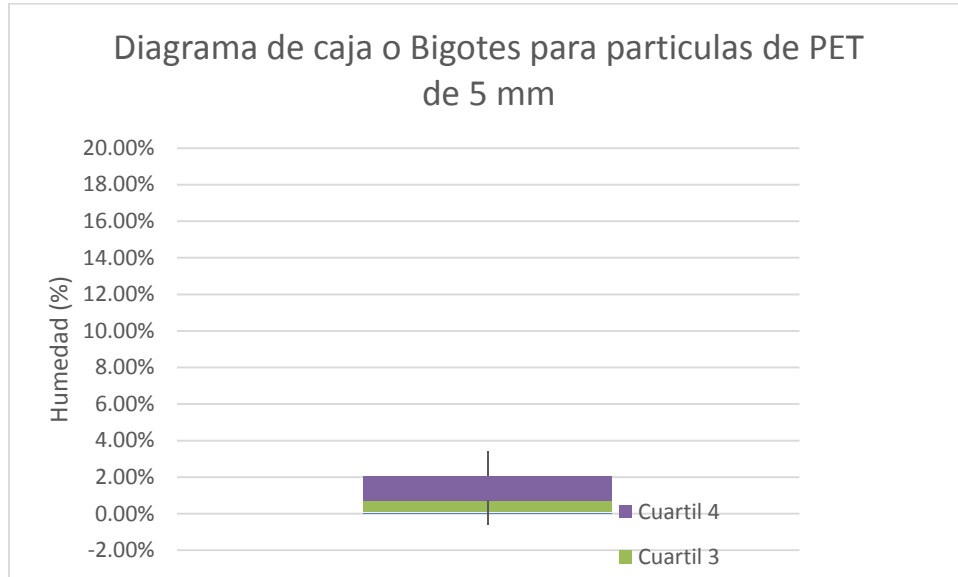
Dados los valores de las tablas 4.-16 se hace una comparación de los resultados en donde se ratifica la amplia diferencia entre un modelo de tendencia y el otro, pues en el mayor de los casos el promedio es mayor a la mediana que adicionalmente tienen un rango bastante amplio. Los valores obtenidos en esta tabla permitieron la creación de la ilustración 4-17, de la cual mejoran la percepción de la pérdida de agua del bloque durante el proceso de secado que se ve reflejado en obra al instante de presentar o no fisuras.

Los resultados son claros: adicionarle partículas de 2 mm de PET en términos de la humedad no genera algún cambio abrupto frente a un bloque con un contenido de 0% PET. Por el contrario la aplicación de partículas de 5 mm de PET tiene dos tendencias: el comportamiento para 30% de contenido en el cual va a requerir menores cantidades de agua a la hora del curado de los bloques de concreto, adicionalmente al mortero de pega no le restará humedad durante la construcción de la mampostería lo que trae consigo una gran cohesión en el muro como elemento; los siguientes comportamientos pertenecen a la adición de 20% y 40% en donde su humedad fue superior a la de un bloque sin PET, en especial para el 40% de contenido, lo que indica la necesidad de un curado minucioso para evitar la pérdida de agua durante la construcción de la mampostería, el no tener en cuenta estas recomendaciones puede ocasionar:

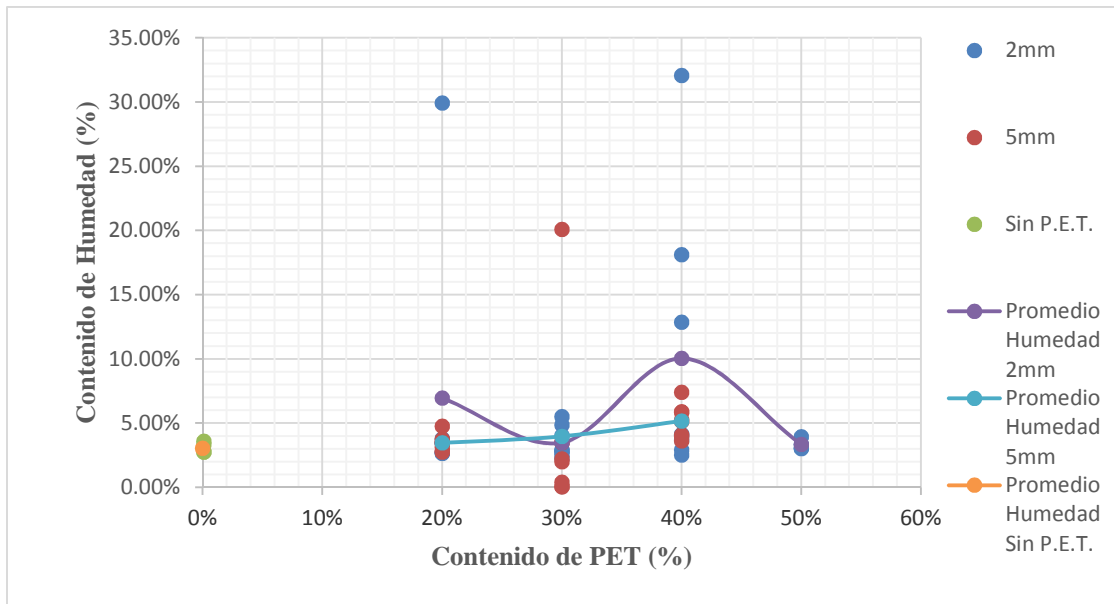
- Fisuración en el mortero de pega, durante el fraguado del mortero de pega se aumentará el calor en su propio núcleo como en los elementos adyacentes, el bloque al ser un material higroscópico tratará de tomar agua del mortero de pega para compensarse generando grietas entre el bloque y la pega debilitando su cohesión, disminuyendo la capacidad del muro.
- Eflorescencias, la cuales se producen al evaporarse el agua del bloque activando la cristalización de sales al interior del bloque, generando un polvo blanco. En una primera medida no es un factor destructivo, pero es el indicativo de daño, pero sí de futuras patologías; Además prevé un mal aspecto en muros a la vista.
- Criptoflorescencias, posterior a las eflorescencias la conversión de material en polvo y el desprendimiento de este traen consigo cavidades en las caras del bloque que se pueden convertir en un mal aspecto para la apariencia y pérdidas en la geometría del mampuesto reduciendo la capacidad del bloque en términos de esfuerzos.



**Ilustración 4-22 Diagrama de cajas y bigotes para Contenido de humedad en bloques con PET de 2mm**



**Ilustración 4-23 Diagrama de cajas y bigotes para Contenido de humedad en bloques con PET de 5mm**



**Ilustración 4-24 Contenido de humedad en bloque de concreto con PET**

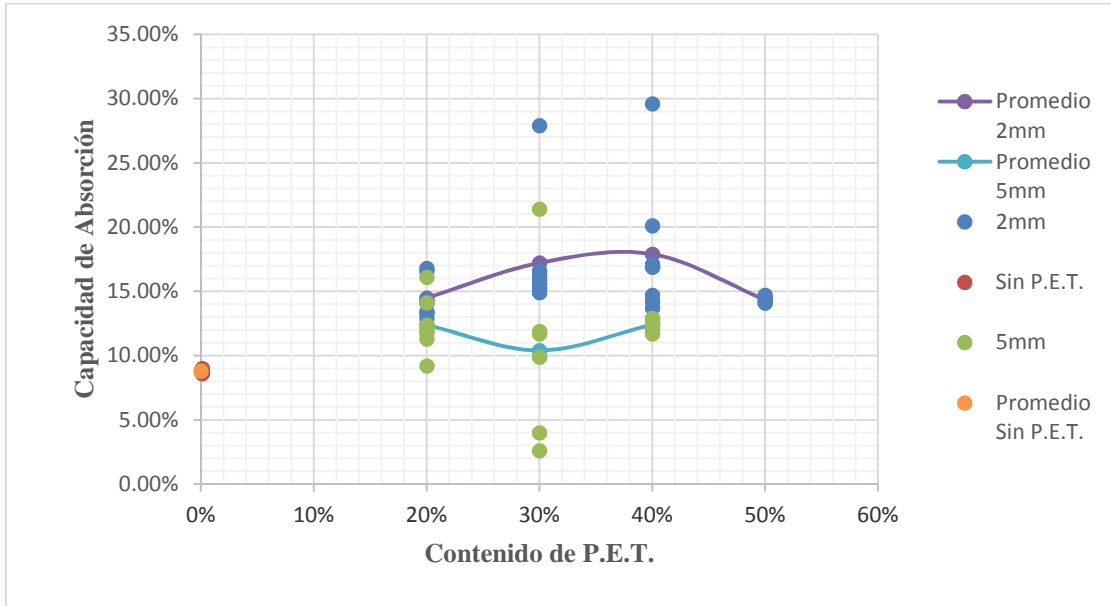
Es igualmente importante comprender la capacidad de absorción que tienen los bloques de PET que se podría considerar como una característica inversa a la humedad, pues esta evalúa la capacidad del bloque de ganar agua, en donde es importante que el contenido de humedad no sea superior a su absorción pues

estaría indicando que no es posible compensar la pérdida de agua durante el curado de la mampostería, caso que solo sucedió en dos bloques evaluados con unas partículas de 5 mm y contenido de PET de 30% los cuales no logran adquirir más del 5% de peso (ver figura 4-25), pero a todo esto se puede concluir que el PET en cualquiera de sus tamaños, ayuda a ampliar la capacidad de absorción del agua para mejorar la adquisición de agua para mejorar al curado del elemento, con respecto a los bloques ensayados con contenido de 0% PET pues el rango de todos sus valores se encuentran por encima de la línea amarilla de la mediana determinada a partir de las muestras de referencia.

Los valores evaluados se presentan en las tablas 4-15 y 4-16.

**Tabla 4-17 Valores para el contenido de absorción en bloques de concreto con PET.**

	Máximo	Mínimo	Rango	Promedio absorción	Mediana absorción
<b>2mm</b>					
50%	14.70%	8.60%	6.10%	14.35%	14.30%
40%	29.60%	13.70%	15.90%	17.90%	16.90%
30%	27.90%	14.90%	13.00%	17.21%	15.75%
20%	16.80%	12.90%	3.90%	14.49%	14.10%
<b>5mm</b>					
40%	12.90%	11.70%	1.20%	12.40%	12.50%
30%	21.40%	2.60%	18.80%	10.40%	10.80%
20%	16.10%	9.20%	6.90%	12.38%	12.05%
<b>Sin PET</b>					
0%	9.00%	8.60%	0.40%	8.80%	8.80%



**Ilustración 4-25 Capacidad de absorción en bloques de concreto con PET**

#### 4.5. Evaluación económica

Se realiza el análisis de costos a los materiales utilizados en la elaboración del mampuesto, teniendo en cuenta que el elemento PET es adquirido al detal por unidad de kilogramo a la empresa recicladora PET & solo PET localizada en la ciudad de Bogotá.

La arena y cemento argos es adquirido en la fábrica de bloques El Sol de la ciudad de Ibagué, Tolima.

Los costos de los materiales para las 3 mezclas realizadas son las siguientes:

**Tabla 4-18 Costo de materiales para bloques con PET de 2mm de tamaño.**

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	V/UNT	VALOR TOTAL
CEMENTO GRIS	KG	0.88	500	440
ARENA PARA MORTERO	M3	0.0031	30.000	93
PET 40 %	KG	1.45	1.800	2.610
TOTAL MATERIALES				<b>3.143</b>

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	V/UNT	VALOR TOTAL
CEMENTO GRIS	KG	0.88	500	440
ARENA PARA MORTERO	M3	0.0036	30.000	108
PET 30 %	KG	1.12	1.800	2.013
TOTAL MATERIALES				<b>2.562</b>

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	V/UNT	VALOR TOTAL
CEMENTO GRIS	KG	0.88	500	440
ARENA PARA MORTERO	M3	0.0041	30.000	124
PET 20 %	KG	0.57	1.800	1.029
TOTAL MATERIALES				<b>1.593</b>

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	V/UNT	VALOR TOTAL
CEMENTO GRIS	KG	0.88	500	440
ARENA PARA MORTERO	M3	0.0050	30.000	150
TOTAL MATERIALES				<b>590</b>

**Tabla 4-19 Costo de materiales para bloques con PET de 5mm de tamaño.**

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	V/UNT	VALOR TOTAL
CEMENTO GRIS	KG	0.88	500	440
ARENA PARA MORTERO	M3	0.0031	30.000	93
PET 40 %	KG	2.05	1.800	3.690
TOTAL MATERIALES				<b>4.223</b>

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	V/UNT	VALOR TOTAL
CEMENTO GRIS	KG	0.88	500	440
ARENA PARA MORTERO	M3	0.0036	30.000	108
PET 30 %	KG	1.21	1.800	2.178
TOTAL MATERIALES				<b>2.726</b>

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	V/UNT	VALOR TOTAL
CEMENTO GRIS	KG	0.88	500	440
ARENA PARA MORTERO	M3	0.0041	30.000	124
PET 20 %	KG	0.87	1.800	1.566
TOTAL MATERIALES				<b>2.130</b>



DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	V/UNT	VALOR TOTAL
CEMENTO GRIS	KG	0.88	500	440
ARENA PARA MORTERO	M3	0.0050	30.000	150
	TOTAL MATERIALES			<b>590</b>

Del análisis de precios realizado podemos observar los altos costos en la elaboración de un mampuesto con PET, en donde influye el valor de adquisición del elemento reciclado, como recurso alternativo y en otro evento se podría analizar los costos desde la recolección, proceso de separación, limpieza y triturado del PET.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

- Debido al auge que ha surgido con respecto al uso del PET, se ha incrementado su valor debido a su acopio y transformación, razón por la cual los costos iniciales se vieron afectados sustancialmente.
- El valor agregado que tiene el PET está representado en la limpieza y transformación, ya que es necesario realizar una serie de procesos manuales y mecánicos. Es por esta razón que una manera de minimizar este costo sería haciendo este proceso sin intermediarios, el cual se estima por kg en \$800 en la ciudad de Medellín (valor suministrado por Enka Colombia)
- Para la elaboración de mampuestos con mortero y PET es importante tener en cuenta que el porcentaje de agua no debe ser mayor o igual a la usada en un mortero convencional, ya que el PET no posee la capacidad de absorción que tienen los agregado y su textura es lisa.
- Buscar nuevas alternativas que permitan la disminución de uso PET o en lo posible hacer un llamado a la comunidad para que tome conciencia de la problemática ambiental que trae consigo el uso indiscriminado de este material.
- Clasificar el PET por colores para dar una apariencia más innovadora a los bloques.
- Las propiedades mecánicas y su comportamiento frente al estado de esfuerzos se encuentran ligadas principalmente al tamaño de las partículas de PET de la siguiente manera:
- Las partículas de PET de 2mm reducen la resistencia a la compresión es decir para un 20% de contenido puede tener en promedio 2.18 MPa y para un 50%de contenido apenas llega a un promedio de 1.45 Mpa, es decir puede decaer un 33% su resistencia. Adicionalmente entrega

valores muy dispersos en la mayoría de sus dosificaciones la variación es del 52% para un contenido de 20% y de 53% para un contenido de 40%, indicando la inestabilidad del material, aunque es claro que a menor proporción menor será el daño.

- El comportamiento de las partículas de 5 mm en términos de la resistencia a la compresión es una parábola abierta hacia arriba en donde la mejor manera de determinar su mejoría sería mediante un contenido óptimo, el cual es aquel que presente los mejores resultados en sus puntas y al cual pertenece el 40%, con una resistencia de 3.71 Mpa y la cohesión de los datos es de 2% haciéndolo “estable”, contrariamente el contenido nocivo para este material estaría en la implementación 30% en donde la resistencia a la compresión es de 2.47 MPa lo cual lo separa un 33% y este tiene una variación de 22% que se separa del anterior contenido en 20%.
- La resistencia a la compresión está fuertemente ligado a la densidad del material, pero no es un factor definitivo pues la adición de partículas de 5 mm con un contenido de 40% de PET mejora la resistencia a la compresión sin tener materiales tan pesados pasando de 3.23 Mpa (promedio) a 3.71 Mpa (promedio) es decir un 13% aproximadamente; así mismo la adición de 5 mm de PET en distintos tamaños no genera una dependencia directa a la densidad ya que el comportamiento usual de estos materiales se torna parabólico abierto hacia arriba.
- A pesar de que la resistencia a la flexión no es un parámetro de aceptación o rechazo a la hora de evaluar un bloque de mortero pues no se encuentra un valor por referencia de la norma, es importante agregar que los bloques con la adición de PET experimentan pérdidas: con la adición de 5 mm de PET hasta del 51% aproximadamente (valor referenciado de la tabla 4-10); con la adición de 2 mm de PET pérdidas en la flexión de más de 80% aproximadamente (Referenciado de la tabla 4-9).
- Los módulos de elasticidad de un concreto normal para los bloques según el título C de la norma NSR-10, opcionalmente podrán calcularse mediante el modelo  $E = w_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f'c}$  el cual depende de dos variables, de la densidad del material y el aporte por parte de la resistencia a la

compresión. Lo cual lo hace más sensible a comparación, puesto que en este modelo no predominan los mayores valores de la resistencia a la compresión como es usual, esto se deduce a partir de la siguiente conjetura: los bloques de 5 mm de PET con resistencias entre 3.59 y 3.79 Mpa de  $f'c$  alcanzaron módulos entre 5200 Mpa y 5900 Mpa en cambio el 0% de contenido de PET obtuvo los mismos módulos de pero con resistencias inferiores en el rango de 2.5 Mpa y 3.5 Mpa.

- El ensayo de humedad en los bloques al indicar la cantidad de agua en porcentaje con respecto al peso total del elemento, esta agua puede perderse en buena proporción durante el proceso de secado que genera el fraguado del concreto, esto apunta a una capacidad de mantener estable su peso mediante la adición de 2 mm de PET puesto que con la cantidad óptima de 20% su humedad es de apenas 3.40%, sin embargo la adición de 5 mm de PET trae como consecuencia cambios un poco más abruptos en su peso pues su humedad es de 5.20%, lo que traerá consigo la implementación de un mejor curado.
- La adición de PET con un contenido de 40% y partículas de 5 mm mejora el promedio de los que no contienen PET de 3.23 MPa a 3.71 MPa es decir un 13.5%, adicionalmente no es recomendable la implementación de partículas en cualquier proporción de 2 mm, pues en promedio se podría perder la resistencia a 2.18 Mpa aproximadamente un 41%. En base al anterior análisis, se recomienda la implementación de PET.
- Comparando los resultados obtenidos de 3.23 Mpa frente al valor mínimo exigido por norma para mampostería no estructural de 5 Mpa, se concluye que los bloques no cumplen los requisitos mínimos por norma.
- Para poder alcanzar los valores normativos en futuras investigaciones se recomienda un cambio en el diseño de mezcla del concreto en cuanto a arena, agua y cemento, conservando el 40% de contenido de PET con partículas de 5 mm.

## 6. Referencias

Alesmar, L., Rendon, N., & Korody, M. E. (2008). *Diseño de mezclas de tereftalato de polietileno (PET)-cemento*. Revista de la facultad de ingeniería de la U.C.V., 11.

Asociación colombiana de ingeniería sísmica (2010). *Reglamento colombiano de construcción sísmoresistente*. En A. C. sísmica, Reglamento colombiano de construcción sísmoresistente (pág. 84). Bogotá.

Chowdhury, S., Tashkan, A., & Suganya, O. (2013). *Polyethylene Terephthalate (PET) Waste*. International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences (IJCEBS), 5.

Concretodo. (2013). *concretodo*. Obtenido de concretodo: <http://www.concretodo.com/id.html>

Gaggino, R. (2008). *Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados aptos para la construcción*. Revista INVI universidad de Chile, 28.

Molina, S. A., Vizcaino, A. M., & Ramirez, F. D. (2007). *Estudio de las características físico-mecánicas de ladrillos elaborados con plástico reciclado*. Bogotá.

Ortega Leyva, M. N. (2011). *El reciclaje de PET está en su mejor momento*. Tecnología del Plástico, 1.

Pullaguari, A. S. (2010). *Diseño de bloques de polietileno tereftalato*. Quito.

Takeuchi, C. P. (2007). *Comportamiento de la Mampostería Estructural*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.