

**IMPLEMENTACION DE MATERIAL PLÁSTICO RECICLADO, (PET) PARA LA
ELABORACIÓN DE UN BLOQUE DE HORMIGON**

JULIANA ANDREA BELTRAN PATARROYO

MARIA CAMILA FERREIRA RUEDA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

**IMPLEMENTACION DE MATERIAL PLÁSTICO RECICLADO, (PET) PARA LA
ELABORACIÓN DE UN BLOQUE DE HORMIGON**

**JULIANA ANDREA BELTRAN PATARROYO
MARIA CAMILA FERREIRA RUEDA**

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniera Civil

Director

**LUIS ALBERTO CAPACHO SILVA
M.Sc. en Ciencias de la Información e Informática**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

Este nuevo logro obtenido es de ustedes:

A mis padres, Edelmira Patarroyo Mora y Roque Julio Beltrán Osorio.

Por su amor, dedicación y paciencia incondicional.

Al amor, Edicson Cortés por soñar a mi lado, brindarme su confianza y apoyo.

A mi compañera, Camila por todo el esfuerzo y entrega.

A mi familia y amigos, por ayudarme a crecer.

A la vida, por las dificultades que me han llevado a ser lo que soy.

Gracias...

Juliana Andrea Beltrán Patarroyo

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis principalmente a la vida, porque a pesar de las adversidades, me brindó la oportunidad de alcanzar un logro más, de poder realizar y seguir mis sueños.

*Con mi amor a mis padres, Mauricio Orlando Ferreira Vergel y Claudia Patricia Rueda Quintero
Por su apoyo incondicional, por sus esfuerzos y por sus enseñanzas que me forjaron en lo que soy,
Y a mi pequeño hermano Mauricio Ferreira Rueda, por ser parte de esta aspiración.*

*A mis compañeros y amigos, que compartieron conmigo buenos y malos momentos,
Que me aportaron conocimiento, experiencias y consejos durante mi proceso de formación.*

*A mi fiel socia Juliana, porque juntas logramos sacar adelante este proyecto,
Con mucho trabajo, dedicación y paciencia.*

Finalmente, a cada una de las personas que contribuyeron e hicieron posible este ideal.

Maria Camila Ferreira Rueda

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todas los entes que participaron en la realización de este proyecto de investigación, por todo su apoyo intelectual y material:

A la UNIVERSIDAD INSDUTRIAL DE SANTANDER por hacernos parte de ella y formarnos como profesionales íntegros.

AI PARQUE TECNOLÓGICO DE GUATIGUARÁ – UIS, por permitirnos utilizar sus instalaciones para los ensayos necesarios en este proyecto.

A LUIS ALBERTO CAPACHO, ingeniero Civil M.sc. Director de la investigación, por su colaboración y aportes.

A DIPRECO S.A., por proveer el material granular y prestar su servicio para la producción de los bloques.

A PRETCO S.A.S, por suministrar el material plástico (PET).

A JAIRO HERNANDEZ SALAZAR, técnico del laboratorio de materiales, por su asesoría y colaboración indispensable a lo largo de esta investigación.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS.....	19
1.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
2. METODOLOGÍA	20
2.1 MATERIALES	20
2.1.1 Material Granular Fino	20
2.1.2 Material Granular Grueso.....	22
2.1.3 Cemento Portland Tipo 1	24
2.1.4 Polietileno Tereftalato (PET)	24
2.2 DISEÑO DE MEZCLA.....	25
2.3 IMPLEMENTACIÓN DE PET COMO SUSTITUYENTE DEL MATERIAL GRANULAR FINO.	26
2.4 PROCESO DE MEZCLADO	27
2.4.1. Asentamiento	28
2.4.2 Preparación de muestras	28
2.5 ELABORACIÓN DE BLOQUES H-15	29
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	31
3.1 PORCENTAJE ÓPTIMO DE SUSTITUCIÓN DE PET.....	31
3.2 ENSAYO DE ABSORCIÓN DE BLOQUES	32
3.3 ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE BLOQUES	34
3.4 ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN DE BLOQUES	36
4. CONCLUSIONES	38
5. OBSERVACIONES.....	40

BIBLIOGRAFÍA.....41
ANEXOS44

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Material Granular Fino	20
Figura 2. Curva granulométrica Agregado Fino	21
Figura 3. Material Granular Grueso	22
Figura 4. Curva granulométrica de los agregados	23
Figura 5. Polietileno Tereftalato (PET), pulverizado tamiz N°50	24
Figura 6. Curva granulométrica del PET.....	26
Figura 7. Prueba SEM, muestra de concreto hidráulico con plástico.....	27
Figura 8. Ensayo de Asentamiento diseño de mezcla	28
Figura 9. Bloques H-15convencionales realizados con la ayuda de Dipreco S.A. .	30
Figura 10. Modelado Estadístico de los Datos.....	32
Figura 11. Absorción de Bloques.....	33
Figura 12. Ensayo a Compresión.....	34
Figura 13. Esfuerzo Neto ensayo a Compresión de Bloques.	35
Figura 14. Ensayo a Flexión	36
Figura 15. Esquema de Montaje para Ensayo a Flexión.	36
Figura 16. Módulo de rotura de Bloques.....	37

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos Complementarios del Agregado Fino	22
Tabla 2. Distribución granulométrica del Agregado Grueso.....	22
Tabla 3. Datos Complementarios del Agregado Grueso.....	23
Tabla 4. Características del Cemento.....	24
Tabla 5. Distribución granulométrica del PET.....	25
Tabla 6. Propiedades Complementarias del PET	25
Tabla 7. Dosificación Diseño de Mezcla.	26
Tabla 8. Sustitución Volumétrica de Agregado Fino por PET	27
Tabla 9. Dimensiones Bloques H-15.....	29
Tabla 10. Resultados de cilindros del ensayo a compresión	31
Tabla 11. Resultados Ensayo de Absorción de Bloques	33
Tabla 12. Resultados Ensayo a Compresión de Bloques	35
Tabla 13. Resultados Ensayo a Flexión de Bloques.....	37

LISTADE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Ensayos preliminares de los agregados.....	44
Anexo B. Ensayos preliminares del PET	48
Anexo C. Diseño de mezcla.....	50
Anexo D. Análisis químico de la muestra de concreto con implementación de PET mediante prueba SEM	54
Anexo E. Análisis de la implementación del PET como reemplazo del material granular fino, modificando la relación agua – cemento.....	57

RESUMEN

Titulo. Implementación de material plástico reciclado, (PET) para la elaboración de un bloque de hormigón*

Autor: Juliana Andrea Beltran Patarroyo **

Palabras Clave: PET, Bloque de hormigón, Mampostería Estructural, Absorción, Compresión, Flexión

En la presente investigación, se implementó el uso de politereftalato de etileno reciclado (PET) para la fabricación de bloques de concreto H15, con uso en mampostería estructural. Así mismo, se realizó un análisis comparativo entre las propiedades de absorción, resistencia a compresión y flexión, con bloques convencionales. Inicialmente se determinó el diseño de mezcla que cumple con una resistencia a compresión de 3000 psi según la norma ACI 301S-10 para los bloques convencionales. Posteriormente, se procedió a la incorporación de material PET pulverizado con un tamaño representativo de 0.3 mm (Tamiz #50) en porcentajes de 1%, 3%, 5%, 7% y 9% mediante la sustitución del material granular fino. El rendimiento a compresión a 28 días de los cilindros con diseño de mezcla con 1% de PET fue de 3033 psi, con 3% de PET fue de 3021 psi, con 5% de PET fue de 3006 psi, con 7% de PET fue de 2808 psi y con 9% de PET fue de 2606 psi. Por tal razón, mediante la ejecución de un modelado estadístico, se seleccionó 4% como valor óptimo para la elaboración de los bloques; los cuales dieron como resultado un porcentaje de absorción media de 6.2%, una resistencia media a compresión de 9.9 MPa y un módulo de rotura medio de 0.6 MPa. Valores que cumplen con las especificaciones establecidas en la norma NTC 4026 para bloques de concreto.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director Luis Alberto Capacho Silva M.Sc. Ingeniería Civil

ABSTRACT

Title. Business practice in the company ALICON & ING S.A.S as engineering assistant in the field of geotechnics*

Author: Juliana Andrea Beltran Patarroyo **

Key Words: PER, Concrete block, Structural masonry, Absorption, Compressive, Flexural..

In this research, the use of recycled ethylene polyterephthalate (PET) was implemented for the manufacture of H15 concrete blocks for structural masonry. Likewise, a comparative analysis was carried out between the properties of absorption, resistance to compression and bending, with conventional blocks. Initially the design of the mixture that meets a compressive strength of 3000 psi was determined according to the ACI 301S-10 standard for conventional blocks. Subsequently, was incorporate powdered PET with a representative size of 0.3 mm (Sieve # 50) in percentages of 1%, 3%, 5%, 7% and 9% by replacing the fine granular material. The 28-day resistance of cylinders with mixing design with 1% of PET was 3033 psi, with 3% of PET was 3021 psi, with 5% of PET was 3006 psi, with 7% of PET was 2808 psi and with 9% of PET was 2606 psi. For this reason, through the execution of a statistical modeling, 4% was selected as the optimum value for the elaboration of the blocks; Which resulted in an average absorption of 6.2%, an average compression strength of 9.9 MPa and an average breaking modulus of 0.6 MPa. Values that comply with the requirements established in the norm NTC 4026 for concrete blocks.

* Degree work

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering School of Civil Engineering Director Luis Alberto Capacho Silva M.Sc. Civil Engineering

INTRODUCCIÓN

La ingeniería civil tiene como objetivo fundamental, aprovechar los recursos naturales para lograr así, el bienestar progresivo de la humanidad, mediante la construcción de infraestructura, teniendo en cuenta la responsabilidad que tiene, de evaluar, prevenir, minimizar y mitigar los posibles impactos ambientales que puede generar las obras¹.

Asimismo, la necesidad de contribuir con la reducción del impacto ambiental, ocasionado en parte, por los residuos de materiales plásticos, ha provocado por ejemplo que “durante el 2015 se recuperaron entre 3.000 y 3.500 toneladas de envases PET, lo que representa tan solo el 26% del total en nuestro país.”².

Por lo cual, en Colombia, el reciclaje del material plástico se encuentra en auge, cada año se ve el incremento del uso del PET para varios productos en la industria³. Se espera, que grandes empresas nacionales inviertan en maquinaria y tecnología para dar uso y generar la industrialización del reciclaje del PET⁴.

El Polietileno Tereftalato (PET), es conocido también como: politereftalato de etileno, (Polyethylene Terephtalate). Es un tipo de plástico muy usado en envases

¹ BASTIDAS DUARTE J.V. y CALDAS DUEÑAS D.F., “Ingeniería civil y medio ambiente”, L’esprit Ingénieux, vol. 1, 2010

² DANIEL S.Z. , “Solo 26% de las botellas plásticas se recicla”, La República. [en línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/solo-26-de-las-botellas-plasticas-se-recicla-2357536>

³ EQUIPO EDITORIAL DE TECNOLOGÍA DEL PLÁSTICO, “En Colombia, el reciclaje de PET botella a botella tiene futuro”, Tecnología del Plástico. [en línea]. Disponible en: <http://www.plastico.com/temas/En-Colombia,-el-reciclaje-de-PET-botella-a-botella-tiene-futuro+3089010?pagina=1>

⁴ ANGEL, I. “Se industrializó el reciclaje de plástico”, El Tiempo. [en línea]. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-174051>

de bebidas y textiles (tipo 1). Es un poliéster termoplástico y se produce a partir de dos compuestos principalmente: Ácido Terftálico y Etilenglicol⁵.

Por consiguiente, el presente proyecto de investigación ofrece una alternativa ecológica empleando material plástico reciclado (PET) como componente para la elaboración de un bloque de hormigón H15, buscando involucrar las propiedades físico-mecánicas del mismo y además comprobando que cumpla con las características de resistencia de un bloque convencional del mercado.

El bloque de hormigón, se caracteriza por estar constituido a base de cemento Portland, agua y agregados finos y/o gruesos, con o sin aditivos, pigmentos colorantes, de forma prismática con dimensiones normalizadas y suelen ser perforados o macizos, utilizados en la mampostería estructural⁶.

Por lo tanto, se realizará un diseño de mezcla para la fabricación de un bloque H15 convencional, el cual será analizado mediante ensayos de laboratorio para determinar su resistencia a la compresión y flexión, asegurando que cumplan con lo especificado en la NTC 4026⁷ y en la NTC 4017⁸.

A su vez, se busca reemplazar su estructura granular fina en diferentes proporciones volumétricas por material plástico reciclado (PET) en porcentajes crecientes de 1%, 3%, 5%, 7% y 9%, para la creación de un bloque compuesto H15, con el fin de obtener una combinación adecuada de propiedades que garanticen un cumplimiento equivalente de los parámetros establecidos por la

⁵ MARIANO C., "Propiedades del PET", Tecnología de los Plásticos, 2011

⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Ingeniería civil y arquitectura. Unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería estructural. Norma Técnica Colombiana 4026. 1997

⁷ *Ibíd.*

⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Ingeniería civil y arquitectura. Método para muestreo y ensayos de unidades de mampostería. Norma Técnica Colombiana 4017. 2005

NTC 4026⁹ previstas para la fabricación de unidades de concreto para mampostería estructural. Por tal razón, lo anterior se podrá ver evidenciado mediante el ensayo de resistencia a compresión a 28 días, de absorción y el ensayo de resistencia a flexión, según la NTC 4017¹⁰ .

⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC 1997 Op. Cit.

¹⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC 2005 Op. Cit.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Implementar material plástico reciclado (PET) para la elaboración de un bloque de hormigón H15, que cumpla con las características de un bloque convencional.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las proporciones óptimas de material plástico reciclado como sustituyente de agregado fino en la composición de un bloque de hormigón que cumpla con los parámetros establecidos por las normas técnicas colombianas (ensayo a compresión, y flexión).
- Ejecutar por medio de ensayos de laboratorio un análisis comparativo entre un bloque de hormigón H15 modificado con material plástico reciclado (PET) y un bloque convencional.

2. METODOLOGÍA

En la presente investigación se tuvo como referencia el método volumétrico propuesto por el *American Concrete Institute (ACI)*, el cual se describe en este capítulo.

2.1 MATERIALES

Todos los materiales de este estudio se mantuvieron en condiciones ambientales constantes para que sus condiciones de humedad no se modificaran.

2.1.1 Material Granular Fino

Figura 1. Material Granular Fino

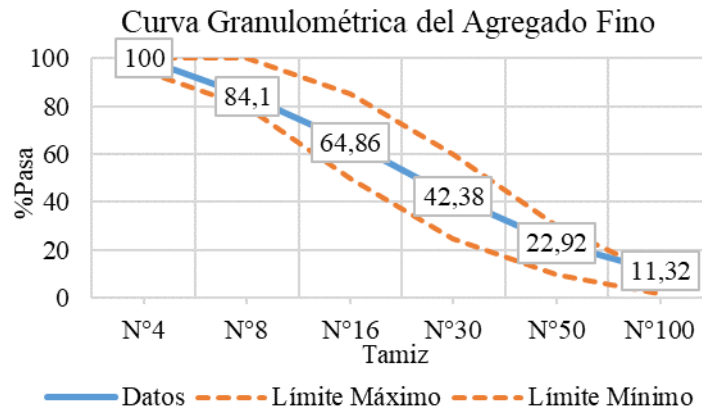


Se determinó la distribución de los tamaños de las partículas teniendo en cuenta la norma NTC 77 ¹¹, los resultados obtenidos muestran el porcentaje y peso del

¹¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. () Concretos. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. Norma Técnica Colombiana 77. 2007

material retenido en cada uno de los tamices utilizados para este análisis, como se muestra **(Figura 2)**.

Figura 2. Curva granulométrica Agregado Fino



Como se observa en la gráfica anterior, la granulometría del agregado fino cumple con lo especificado en la norma NTC 174¹² [9]. Considerando las normas NTC 92¹³ [10], NTC 237¹⁴ [11] y NTC 1776¹⁵ [12] las cuales corresponden al cálculo de masa unitaria, densidad y contenido de humedad de los agregados, respectivamente, se lograron datos complementarios del agregado fino **(Ver Tabla 1)**.

¹² INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto. Norma Técnica Colombiana 174. 2000

¹³ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Ingeniería civil y arquitectura determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados. Norma Técnica Colombiana 92. 1995

¹⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado fino. Norma Técnica Colombiana 237. 1995

¹⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados. Norma Técnica Colombiana 1776. 1994

Tabla 1. Datos Complementarios del Agregado Fino

		AGREGADO FINO		
		NTC 237 NTC 1776	S.G. real	2670,2	Kg/m3
S.G. aparente	2530,7		Kg/m3	
S.G. aparente S.S.S.	2580,1		Kg/m3	
M.F	2,74		-	
% Abs	2,15		%	
% W	0,96		%	

2.1.2 Material Granular Grueso

Figura 3. Material Granular Grueso



La distribución de los tamaños de las partículas de agregado grueso se halló de igual forma al agregado fino (**Ver Tabla 2**).

Tabla 2. Distribución granulométrica del Agregado Grueso

AGREGADO GRUESO					
PESO MUESTRA INICIAL			5000	gr	
PESO MUESTRA SECA			5000	gr	
TAMIZ	ABERTURA [mm]	PESO RETENIDO	% RET. PARCIAL	% RET. ACUM	% PASA
3/8"	9.52	0	0	0	100.0
Nº 4	4.75	5000	100.00	100.00	0.0
FONDO	...	0	0.00	100.00	0.0

Estimando las normas NTC 92¹⁶, NTC 1776¹⁷ y NTC 176¹⁸ se obtuvieron datos complementarios del agregado grueso (**Ver Tabla 3**).

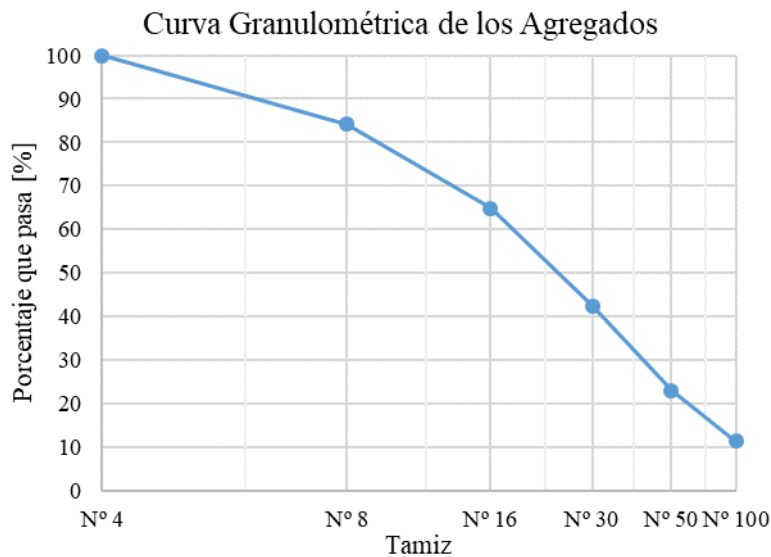
¹⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. 1995 Op. Cit

Tabla 3. Datos Complementarios del Agregado Grueso.

		AGREGADO GRUESO		
NTC 176 NTC 1776	TMN N°4	0,19	plg	
	TM 3/8"	0,37	plg	
	S.G. real	2621,40	Kg/m3	
	S.G. aparente	2497,10	Kg/m3	
	S.G. aparente S.S.S.	2544,53	Kg/m3	
	% ABS	1,90	%	
	% W	0,98	%	

Se presenta la respectiva grafica de la curva granulométrica de los agregados (fino y grueso), en su ordenada, los valores del porcentaje que pasa cada tamiz y en su abscisa, los tamaños de cada uno de ellos (**Ver Figura 4**). Este ensayo se puede ver detalladamente en el **Anexo A**.

Figura 4. Curva granulométrica de los agregados



¹⁷ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. 1994 Op. Cit

¹⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso. Norma Técnica Colombiana 176. 1995

3.1.3 Cemento Portland Tipo 1 Las propiedades del cemento utilizado fueron suministradas por el fabricante **(Ver Tabla 4)**.

Tabla 4. Características del Cemento

DATOS DEL CEMENTO ARGOS		
S.G.	3030	Kg/m ³
Asentamiento	5 a 8	cm

3.1.4 Polietileno Tereftalato (PET) Envases plásticos tipo 1 pulverizados, adquirido en la empresa Pretco S.A.S ubicada en Piedecuesta, Santander.

Figura 5. Polietileno Tereftalato (PET), pulverizado tamiz N°50



Se determinó la distribución de los tamaños de las partículas teniendo en cuenta la norma NTC 77¹⁹, debido a que es una sustitución por material granular fino y se asigna el tamaño representativo con el cual se va a trabajar, es decir, el PET retenido por el tamiz N°50 que pasa 100% el tamiz N°30, como se muestra **(Ver Tabla 5)**. Este ensayo se encuentra detallado en el **Anexo B**.

¹⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC 2007 Op. Cit.

Tabla 5. Distribución granulométrica del PET.

MATERIAL PET					
PESO MUESTRA INICIAL			500	gr	
PESO MUESTRA SECA			500	gr	
TAMIZ	ABERTURA [mm]	PESO RET.	% RET. PARCIAL	% RET. ACUM	% PASA
Nº 4	4.75	0.07	0.0	0.0	100.0
Nº 8	2.36	0.16	0.0	0.0	100.0
Nº 16	1.18	9.56	1.9	2.0	98.0
Nº 30	0.6	115.8	23.2	25.1	74.9
Nº 50	0.3	152.86	30.6	55.7	44.3
Nº 100	0.149	121.46	24.3	80.0	20.0
FONDO	....	100.09	20.0	100.0	0

Las propiedades complementarias del plástico reciclado triturado utilizado, se pueden observar a continuación (**Tabla 6**)

Tabla 6. Propiedades Complementarias del PET

MATERIAL PET			
NTC 237 NTC 1776	S.G. real	1337,5	Kg/m3
	S.G. aparente	1265,2	Kg/m3
	S.G. aparente S.S.S.	1319,3	Kg/m3
	M.F	1,63	-
	% Abs	0,61	%

2.2 DISEÑO DE MEZCLA

Se realizó el siguiente diseño de mezcla para un concreto estructural buscando una resistencia a compresión a 28 días de 3000 psi, teniendo en cuenta las normas que establecen las especificaciones y requisitos para el diseño de mezcla del concreto estructural, aquellas son, ACI 211²⁰ , ACI 318S-05²¹ y ACI 301S-10

²⁰ ACI 211.1, " Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. "de ACI Manual of Concrete Practice. 2007

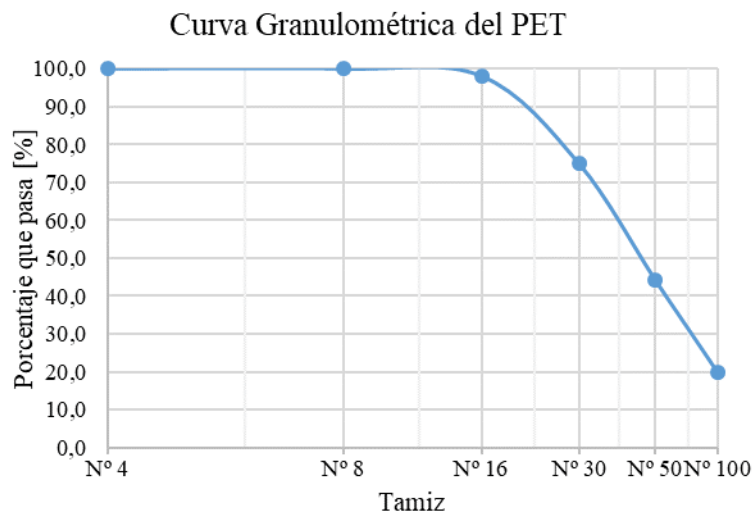
²¹ ACI 218S-05, " Regulation requirements for Structural Concrete. "de ACI Manual of Concrete Practice. 2007

²² . La relación en volumen de los materiales utilizados para una relación agua/cemento de 0.5 (**Ver tabla 7**). El proceso de diseño de mezcla se describe en el **Anexo C**.

Tabla 7. Dosificación Diseño de Mezcla.

PROPORCIONES PARA 1 m ³		
Material	Peso [Kg]	Proporciones
Cemento	450	1
Agua	242	26.93
A. Grueso	688	1.53
A. Fino	919	2.04

Figura 6. Curva granulométrica del PET.



2.3 IMPLEMENTACIÓN DE PET COMO SUSTITUYENTE DEL MATERIAL GRANULAR FINO.

Teniendo como base el diseño de mezcla convencional, se procede a reemplazar agregado fino por PET en diferentes proporciones volumétricas (1%, 3%, 5%, 7%

²² ACI 301S-10, " Specifications for Structural Concrete. " De ACI Manual of Concrete Practice. 2010

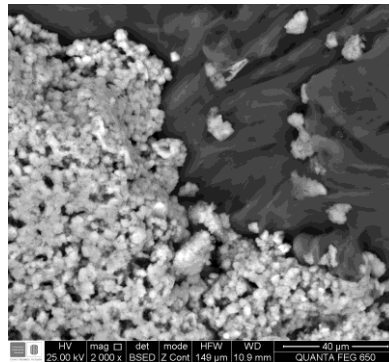
y 9%), el tamaño más representativo como se puede ver (**Tabla 5**) es el retenido por el tamiz #50, por lo tanto, la sustitución se lleva a cabo con agregado fino retenido en dicho tamiz.

Tabla 8. Sustitución Volumétrica de Agregado Fino por PET

Para 1 m ³	A. Fino N° 50		PET
Porcentaje	Peso [Kg]	Volumen [m ³]	Peso [Kg]
1	9.19	0.003	4.60
3	27.57	0.010	13.81
5	45.95	0.017	23.02
7	64.33	0.024	32.23
9	82.72	0.031	41.44

Se realizó una prueba de microscopía electrónica de barrido (SEM) con el objetivo de analizar las propiedades químicas y morfológicas del plástico y su comportamiento con la mezcla de concreto hidráulico, ver **Anexo D**.

Figura 7. Prueba SEM, muestra de concreto hidráulico con plástico.



Fuente. Laboratorio de Microscopía, PTG-UIS.

2.4 PROCESO DE MEZCLADO

Todas las muestras se realizaron en una mezcladora mecánica con una capacidad de 360 litros por un tiempo total de 10 minutos, en este proceso se mezclaron los

agregados finos y gruesos con la mitad de la cantidad de agua por 2 minutos, luego fue adicionado el cemento con el resto del agua por 2 minutos para posteriormente agregar el plástico pulverizado durante 6 minutos. Permitiendo conseguir una composición homogénea entre los materiales.

2.4.1. Asentamiento El diseño de mezcla se realizó para un asentamiento de 50 mm, el cual cumple con lo establecido por la NTC 396²³.

Figura 8. Ensayo de Asentamiento diseño de mezcla



2.4.2 Preparación de muestras El proceso de encofrado para los cilindros se realizó en base a las normas NTC 1377²⁴ y NTC 3512²⁵, haciendo una compactación de 3 capas cada una con 25 golpes y vibrado manual al final. Las dimensiones de los cilindros eran de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. Después de 24 horas de fraguado, las muestras fueron llevadas a un depósito con agua con una temperatura de 21 ± 2 °C hasta el momento de la prueba se

²³ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. Norma Técnica Colombiana 396. 1992

²⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Ingeniería civil y arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio. Norma Técnica Colombiana 1377. 2010

²⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Cementos. Cuartos de mesclado, cámaras y cuartos húmedos y tanques para el almacenamiento de agua, empleados en los ensayos de cementos hidráulicos y concretos. Norma Técnica Colombiana 3512. 2014

compresión. Se elaboraron 2 cilindros por cada dosificación para ensayar a 14 días y poder realizar un control interno del comportamiento de la mezcla y 5 cilindros por cada dosificación para ensayar a 28 días, en total fueron 42 cilindros de ensayo.

2.5 ELABORACIÓN DE BLOQUES H-15

Con la colaboración de la empresa de prefabricados en concreto reforzado, Dipreco S.A ubicada en el anillo vial en Floridablanca, se elaboraron 6 bloques con el diseño de mezcla sin sustitución de plástico, ver Anexo C y 6 bloques con el diseño de mezcla y sustitución del porcentaje de plástico óptimo, los cuales tienen las dimensiones establecidas comercialmente para este tipo de bloque ver **(Tabla 9)**. Considerando el proceso de fabricación de los bloques, se debe realizar con un diseño de mezcla en estado semi-seco.

Tabla 9. Dimensiones Bloques H-15

DIMENSIONES DEL BLOQUE			
Largo		cm	39
Ancho		cm	14
Alto		cm	19
Area Total o Bruta		cm²	546
Hueco tipo A	Largo	cm	15
	Ancho	cm	9
	N°	No	2
Hueco tipo B	Largo	cm	8
	Ancho	cm	1
	N°	No	2
Area Util o Neta		cm²	260

Figura 9. Bloques H-15convencionales realizados con la ayuda de Dipreco S.A.



3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 PORCENTAJE ÓPTIMO DE SUSTITUCIÓN DE PET

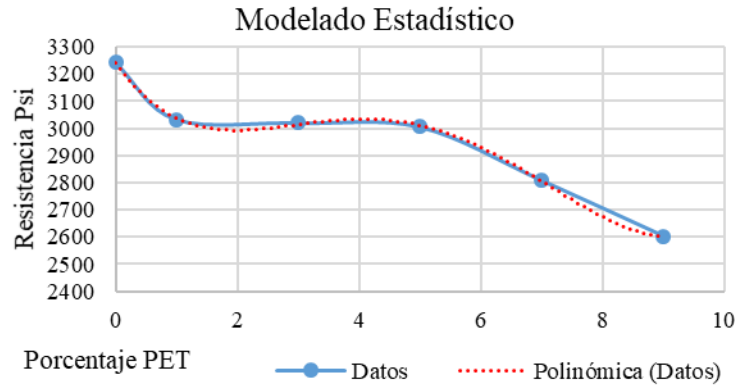
Se presentan los resultados del ensayo a compresión de los 5 cilindros de muestra a 28 días por cada dosificación ya establecidas, teniendo presente que la resistencia requerida mínima es de 3000 psi.

Tabla 10. Resultados de cilindros del ensayo a compresión

	ENSAYO A COMPRESIÓN					
	0%	1%	3%	5%	7%	9%
C1	177.30	169.40	161.20	161.00	154.3	144.2
C2	177.00	160.80	163.80	166.6	156.2	142.6
C3	170.20	159.20	165.30	158.8	145.6	135.9
C4	175.20	156.97	160.64	160.55	150.6	140.8
C5	173.96	170.60	162.75	162.7	149.7	137.7
Carga KN	174.73	163.39	162.74	161.93	151.28	140.24
Res. Psi	3243	3033	3021	3006	2808	2603

Se procede a realizar un modelado estadístico mediante una regresión polinómica de cuarto orden (1), con el fin de hallar los porcentajes de sustitución que cumplan con la resistencia mínima, los cuales son a 1,55 %, 2,47%, 5,19% y 10,92%. **(Ver Figura 10).**

Figura 10. Modelado Estadístico de los Datos



Cuya ecuación se aprecia a continuación.

$$y = 1.1112 x^4 - 22.382 x^3 + 139,36 x^2 - 322,25 x + 3241,6 \quad (1)$$

$$r^2 = 0.9996$$

Y se decide utilizar el 4% de sustitución ya que se encuentra entre el rango óptimo.

3.2 ENSAYO DE ABSORCIÓN DE BLOQUES

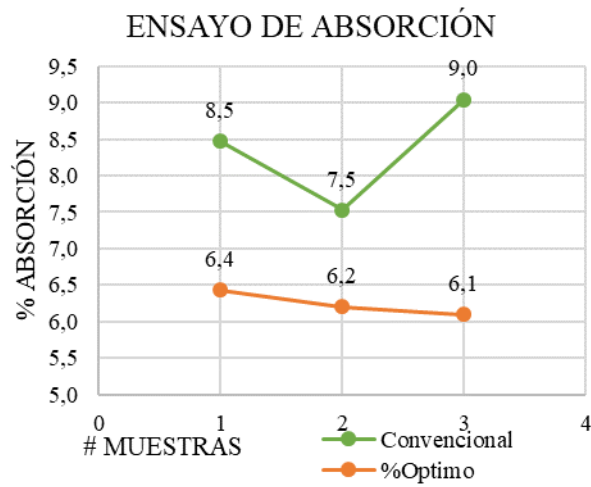
Los bloques se secaron durante 24 horas a 110°C en un horno digital y se registra el peso de las muestras secas como está descrito en la norma NTC 4017²⁶, luego se sumergen en agua por 24 horas y se prosigue a registrar el peso de las muestras húmedas, los porcentajes de absorción se muestran (**Ver Tabla 11 y Figura 11**).

²⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC Op. Cit.

Tabla 11. Resultados Ensayo de Absorción de Bloques

RESULTADOS DEL ENSAYO DE ABSORCIÓN						
DATOS		W _{ss} [kg]	W _s [kg]	ABSORCIÓN [%]	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
CONVENCIONAL	M1	11.65	10.74	8.5	8.4	0.76
	M2	11.42	10.62	7.5		
	M3	11.57	10.61	9.0		
4% PET	M1	11.976	11.252	6.4	6.2	0.17
	M2	12.524	11.793	6.2		
	M3	12.36	11.65	6.1		

Figura 11. Absorción de Bloques.



3.3 ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE BLOQUES

Figura 12. Ensayo a Compresión



Este ensayo se realizó en una Prensa Hidráulica de Ref. CS112298, con una aplicación de carga céntrica, a una velocidad de 0.1 mm/seg. Se ensayaron los 6 bloques realizados a 28 días de curado como lo establece la NTC 4017²⁷ y la NTC 4026²⁸, el esfuerzo a compresión se calculó bajo la ecuación (2), los resultados se aprecian (Ver Tabla 12 y Figura 13).

$$f = \frac{W}{A} \quad (2)$$

²⁷ Ibíd.

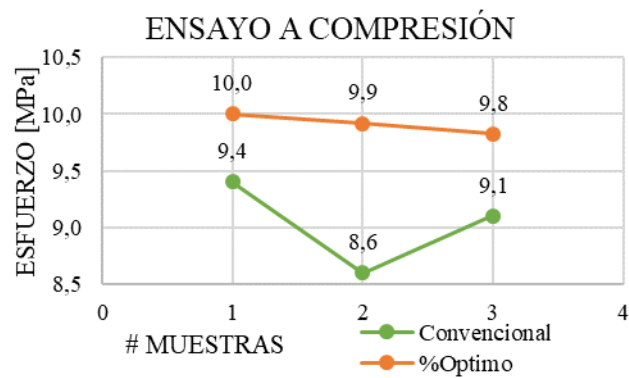
²⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC 1997 Op. Cit.

Donde f es el esfuerzo a compresión en [MPa], W es la carga máxima en [N] y A es el área útil en [mm²], resaltando que en el área útil se desprecian los vacíos que tienen los bloques.

Tabla 12. Resultados Ensayo a Compresión de Bloques

RESULTADOS DEL ENSAYO A COMPRESION					
DATOS		CARGA MAXIMA [N]	ESFUERZO NETO [MPa]	PROMEDIO	DESVIACION ESTANDAR
CONVENCIONAL	M1	245000	9.4	9.0	0.40
	M2	223300	8.6		
	M3	235400	9.1		
4% PET	M4	259900	10.0	9.9	0.09
	M5	257800	9.9		
	M6	255400	9.8		

Figura 13. Esfuerzo Neto ensayo a Compresión de Bloques.



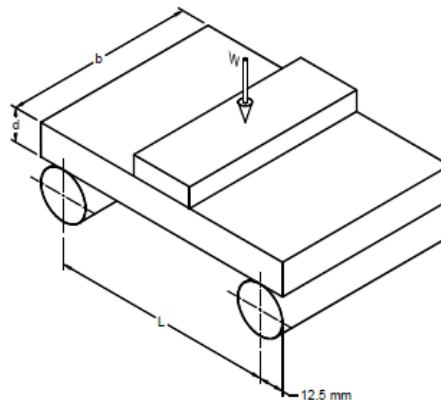
3.4 ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN DE BLOQUES

Figura 14. Ensayo a Flexión



Este ensayo se realizó en la máquina universal de ensayos MTS como lo establece la norma NTC 4017²⁹, a 28 días de curado con una velocidad de carga de 8500 [N/mm] calculando el módulo de rotura bajo la ecuación (3), los resultados de este ensayo se aprecian (Ver Tabla 13 y Figura 14).

Figura 15. Esquema de Montaje para Ensayo a Flexión.



Fuente. NTC 4017.

²⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC 2005 Op. Cit.

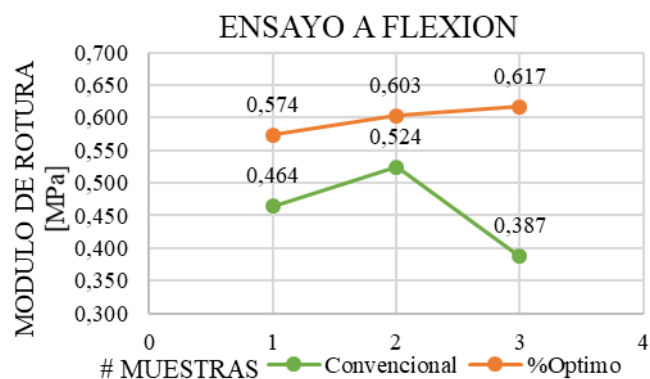
$$MR = \frac{3W * \left(\frac{L}{2} - x\right)}{bd^2} \quad (3)$$

Donde MR es el módulo de rotura en [MPa], W es la carga máxima aplicada por la máquina en [N], L es la longitud libre entre soportes [mm], x es la distancia promedio del plano de falla al centro de la pieza [mm], b es el ancho neto (distancia de cara a cara) de la muestra en el plano de falla [mm] y d es la profundidad (distancia de la cara superior hasta el plano de apoyo) de la muestra en el plano de falla [mm].

Tabla 13. Resultados Ensayo a Flexión de Bloques

RESULTADOS DEL ENSAYO A FLEXIÓN						
DATOS		x [mm]	CARGA MAXIMA [N]	MODULO DE ROTURA	PROMEDIO	DESVIACION ESTANDAR
CONVENCIONAL	M1	41	4072	0.464	0.5	0.07
	M2	27	4185	0.524		
	M3	32	3193	0.387		
4% PET	M4	15	4252	0.574	0.60	0.02
	M5	20	4609	0.603		
	M6	25	4859	0.617		

Figura 16. Módulo de rotura de Bloques



4. CONCLUSIONES

- Del análisis realizado al comportamiento de los diseños de mezcla, con diferentes porcentajes volumétricos de sustitución de agregado fino por PET (1%, 3%, 5%, 7%, 9%), se concluye que existe un rango de aceptación a 21MPa de 1% hasta 5,2% de plástico. Por tal razón se decide utilizar el 4% de plástico como valor óptimo para la producción de bloques.
- En el estudio comparativo del ensayo de resistencia a compresión, se determina que la resistencia promedio de los bloques convencionales y con 4% de PET, son 9 MPa y 9.9 MPa respectivamente. Igualmente, los dos casos cumplen con los requisitos de resistencia a compresión establecidos en la norma NTC 4026³⁰ para mampostería estructural de resistencia baja, el cual debe ser mínimo de 8MPa.
- En el estudio comparativo del ensayo de absorción de agua, se establece un porcentaje de absorción promedio de 8.4% para los bloques convencionales y de 6.2% para bloques con 4% de PET. Asimismo, los dos casos cumplen con los requisitos de absorción de agua establecidos en la norma NTC 4026³¹ para mampostería estructural de peso normal, el cual debe ser máximo de 12%.
- En el estudio comparativo del ensayo de resistencia a flexión, se encuentra que el módulo de rotura promedio es de 0.46 MPa y 0.6 MPa para los bloques convencionales y con 4% de PET respectivamente.

³⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC 1997 Op. Cit.

³¹ Ibíd.

- Los bloques fabricados en la presente investigación cumplen con lo establecido en la norma NTC 4026³² para mampostería estructural de resistencia baja, es decir, pueden emplearse en la construcción de viviendas de 1-2 niveles y otras construcciones semejantes; Permitiendo así, reutilizar aproximadamente 10 envases plásticos (tipo 1) por bloque.
- De acuerdo al análisis químico obtenido mediante la prueba de microscopia electrónica de barrido (SEM), efectuada a las muestras de concreto con implementación de PET, se interpretó que se logra una adherencia favorable entre los materiales la cual beneficia la resistencia de los bloques.

³² Ibíd.

5. OBSERVACIONES

- Se optó por realizar un modelado estadístico mediante una regresión polinómica de cuarto orden como método de análisis de los resultados debido a que solo se tenía una variable dependiente y no era imprescindible llevar a cabo un análisis estadístico con superficie de respuesta.
- Para verificar que la resistencia a compresión y a flexión es mayor en los bloques con sustitución de PET, se recomienda estandarizar el proceso de producción, con la finalidad de evitar factores externos que afecten dichas propiedades de los bloques.
- Se recomienda ver el Anexo E como un estudio complementario más detallado de la implementación del PET con un tamaño representativo N°8 como sustituyente de material granular fino modificando la relación agua-cemento en forma inversamente proporcional.

BIBLIOGRAFÍA

ACI 211.1, “ Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. ”de ACI Manual of Concrete Practice. 2007

ACI 218S-05, “ Regulation requirements for Structural Concrete. ”de ACI Manual of Concrete Practice. 2007

ACI 301S-10, “ Specifications for Structural Concrete. ” De ACI Manual of Concrete Practice. 2010

ANGEL, I. “Se industrializó el reciclaje de plástico”, El Tiempo. [en línea]. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-174051>

BASTIDAS DUARTE J.V. y CALDAS DUEÑAS D.F., “Ingeniería civil y medio ambiente”, L'esprit Ingénieux, vol. 1, 2010.

DANIEL S.Z. , “Solo 26% de las botellas plásticas se recicla”, La República. [EN LINEA]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/solo-26-de-las-botellas-plasticas-se-recicla-2357536>

EQUIPO EDITORIAL DE TECNOLOGÍA DEL PLÁSTICO, “En Colombia, el reciclaje de PET botella a botella tiene futuro”, Tecnología del Plástico. [EN LINEA]. Disponible en: <http://www.plastico.com/temas/En-Colombia,-el-reciclaje-de-PET-botella-a-botella-tiene-futuro+3089010?pagina=1>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado fino. Norma Técnica Colombiana 237. 1995

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados. Norma Técnica Colombiana 1776. 1994

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Cementos. Cuartos de mesclado, cámaras y cuartos húmedos y tanques para el almacenamiento de agua, empleados en los ensayos de cementos hidráulicos y concretos. Norma Técnica Colombiana 3512. 2014

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto. Norma Técnica Colombiana 174. 2000

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Concretos. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. Norma Técnica Colombiana 77. 2007

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Ingeniería civil y arquitectura. Unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería estructural. Norma Técnica Colombiana 4026. 1997

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Ingeniería civil y arquitectura. Método para muestreo y ensayos de unidades de mampostería. Norma Técnica Colombiana 4017. 2005

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Ingeniería civil y arquitectura determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados. Norma Técnica Colombiana 92. 1995

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso. Norma Técnica Colombiana 176. 1995

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. Norma Técnica Colombiana 396. 1992

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. Ingeniería civil y arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio. Norma Técnica Colombiana 1377. 2010

MARIANO C., “Propiedades del PET”, Tecnología de los Plásticos, 2011.

ANEXOS

Anexo A. Ensayos preliminares de los agregados

SEGUN LA NTC 77. METODO PARA EL ANALISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS

Tabla A- 1. Granulometría del Agregado Fino.

AGREGADO FINO						
PESO MUESTRA INICIAL				1000	gr	
PESO MUESTRA SECA				968.68	gr	
TAMIZ	ABERTURA [mm]	PESO RETENIDO	% RET. PARCIAL	% RET. ACUMULAD	% PASA	
Nº 8	2.36	159	15.90	15.90	84.10	
Nº 16	1.18	192.39	19.24	35.14	64.86	
Nº 30	0.6	224.79	22.48	57.62	42.38	
Nº 50	0.3	194.66	19.47	77.08	22.92	
Nº 100	0.149	115.93	11.59	88.68	11.32	
FONDO	0	113.23	11.32	100.00	0.00	
MODULO DE FINURA				2.74		

Tabla A- 2. Granulometría del Agregado Grueso.

AGREGADO GRUESO						
PESO MUESTRA INICIAL				5000	gr	
PESO MUESTRA SECA				5000	gr	
TAMIZ	ABERTURA [mm]	PESO RETENIDO	% RET. PARCIAL	% RET. ACUM	% PASA	
3/8"	9.52	0	0	0	100.0	
Nº 4	4.75	5000	100.00	100.00	0.0	
FONDO	....	0	0.00	100.00	0.0	

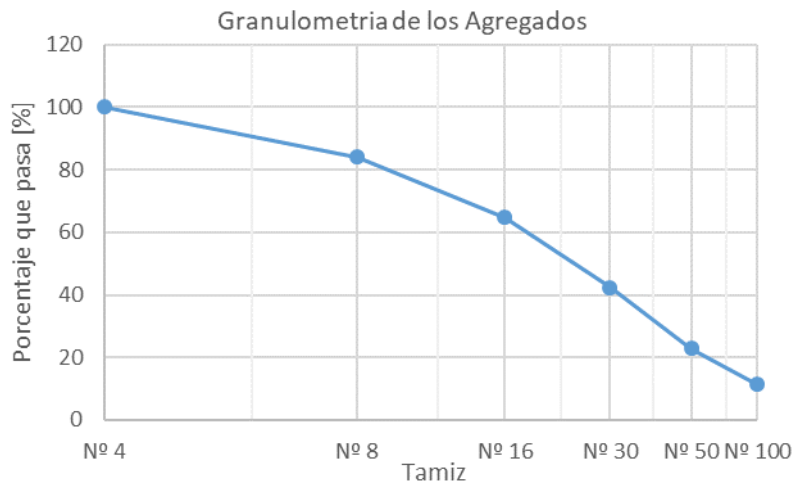


Figura A- 1. Curva Granulométrica de los Agregados.

SEGUN LA NTC 237. METODO PARA DETERMINAR EL PESO ESPECIFICO Y LA ABSORCION DEL AGREGADO FINO

Tabla A- 3. Gravedades específicas y porcentaje de absorción del Agregado Fino.

GRAVEDADES ESPECIFICAS AGREGADO FINO		
PESO DEL FRASCO + AGUA HASTA LA MARCA, EN EL AIRE	652.3	gr
PESO DE LA MUESTRA EN CONDICION S.S.S EN EL AIRE	500	gr
PESO DE LA MUESTRA, FRASCO Y AGUA HASTA LA MARCA	958.6	gr
PESO DE LA MUESTRA SECADA EN EL HORNO	489.49	gr
GRAVEDAD ESPECIFICA REAL	2.67	
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE	2.53	
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE S.S.S	2.58	

% DE ABSORCION	2.15	%
----------------	------	---

SEGUN LA NTC 176. METODO PARA DETERMINAR EL PESO ESPECIFICO Y LA ABSORCION DE AGREGADO GRUESO

Tabla A- 4. Gravedades específicas y porcentaje de absorción del Agregado Grueso.

GRAVEDADES ESPECIFICAS AGREGADO GRUESO		
PESO DE LA MUESTRA EN CONDICION S.S.S EN EL AIRE	5000	gr
PESO DE LA CANASTA, SUMERGIDA EN AGUA	1800	gr
PESO DE LA CANASTA + MUESTRA S.S.S, SUMERGIDA EN AGUA	4835	gr
PESO DE LA MUESTRA EN AGUA	3035	gr
PESO DE LA MUESTRA SECADA EN EL HORNO	4906.8	gr
GRAVEDAD ESPECIFICA REAL	2.62	
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE	2.50	
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE S.S.S	2.54	

% DE ABSORCION	1.90	%
----------------	------	---

SEGUN LA NTC 92. METODO PARA DETERMINAR LA MASA UNITARIA Y LOS VACIOS ENTRE PARTICULAS DE AGREGADOS

Tabla A- 5. Masa unitaria y porcentaje de vacíos del Agregado Fino

PESO UNITARIO AGREGADO FINO		
PESO DEL MEDIDOR + VIDRIO	3046.9	gr
PESO DEL MEDIDOR + VIDRIO + AGUA	5834.9	gr
VOLUMEN DEL MEDIDOR	2.788	dcm3
PESO DEL MEDIDOR VACIO	2559	gr
PESO DEL MEDIDOR + MATERIAL S.S.S COMPACTADO	7260.2	gr
PESO DEL MEDIDOR + MATERIAL S.S.S SUELTO	6842.6	gr
PESO UNITARIO DEL AGREGADO S.S.S COMPACTADO	1686.23	Kg/m3
PESO UNITARIO DEL AGREGADO S.S.S SUELTO	1536.44	Kg/m3

% DE VACIOS	34.68	%
-------------	-------	---

Tabla A- 6. Masa unitaria y porcentaje de vacíos del Agregado Grueso.

PESO UNITARIO AGREGADO GRUESO		
PESO DEL MEDIDOR + VIDRIO	3046.9	gr
PESO DEL MEDIDOR + VIDRIO + AGUA	5834.9	gr
VOLUMEN DEL MEDIDOR	2.788	dcm3
PEPSO DEL MEDIDOR VACIO	2559	gr
PESO DEL MEDIDOR + MATERIAL S.S.S COMPACTADO	6725.9	gr
PESO DEL MEDIDOR + MATERIAL S.S.S SUELTO	6458.9	gr
PESO UNITARIO DEL AGREGADO S.S.S COMPACTADO	1494.58	Kg/m3
PESO UNITARIO DEL AGREGADO S.S.S SUELTO	1398.82	Kg/m3

% DE VACIOS	41.26	%
-------------	-------	---

SEGUN LA I.N.V.E.212-07. CONTENIDO APROXIMADO DE MATERIA ORGANICA, EN ARENAS USADAS, EN LA PREPARACION DE MORTEROS O CONCRETOS.

Este material se considera como limpio y con baja cantidad de materia orgánica, ya que se clasificó con el color 1 según la escala de Gardner, ver (Figura X).

Tabla A- 7. Ensayo de Colorímetro, Agregado Fino. Fuente Autor



Anexo B. Ensayos preliminares del PET

SEGUN LA NTC 77. METODO PARA EL ANALISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS

Tabla B- 1. Granulometría del PET.

MATERIAL PET					
PESO MUESTRA INICIAL			500	gr	
PESO MUESTRA SECA			500	gr	
TAMIZ	ABERTURA [mm]	PESO RET.	% RET. PARCIAL	% RET. ACUM	% PASA
Nº 4	4.75	0.07	0.0	0.0	100.0
Nº 8	2.36	0.16	0.0	0.0	100.0
Nº 16	1.18	9.56	1.9	2.0	98.0
Nº 30	0.6	115.8	23.2	25.1	74.9
Nº 50	0.3	152.86	30.6	55.7	44.3
Nº 100	0.149	121.46	24.3	80.0	20.0
FONDO	....	100.09	20.0	100.0	0
MODULO DE FINURA				1.63	

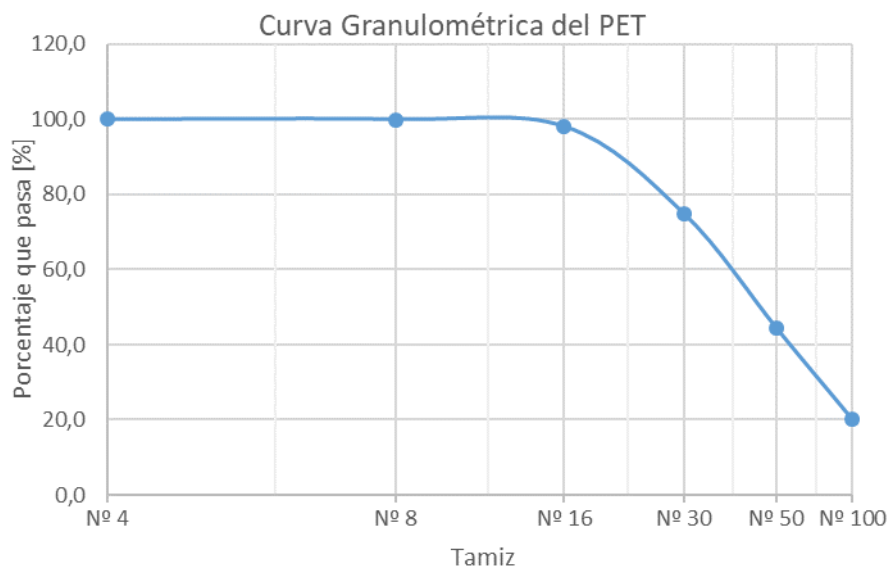


Figura B- 2. Curva Granulométrica del PET.

SEGUN LA NTC 237. METODO PARA DETERMINAR EL PESO ESPECIFICO Y LA ABSORCION DEL AGREGADO FINO

Tabla B- 2. Gravedades específicas y porcentaje de absorción del **PET**.

GRAVEDADES ESPECIFICAS DEL PET		
PESO DEL FRASCO + AGUA HASTA LA MARCA, EN EL AIRE	653.2	gr
PESO DE LA MUESTRA EN CONDICION S.S.S EN EL AIRE	100	gr
PESO DE LA MUESTRA, FRASCO Y AGUA HASTA LA MARCA	677.4	gr
PESO DE LA MUESTRA SECADA EN EL HORNO	95.9	gr
GRAVEDAD ESPECIFICA REAL	1338	kg/m3
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE	1265	kg/m3
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE S.S.S	1319	kg/m3

% DE ABSORCION	0.61	%
----------------	------	---

SEGUN LA NTC 92. METODO PARA DETERMINAR LA MASA UNITARIA Y LOS VACIOS ENTRE PARTICULAS DE AGREGADOS

Tabla B- 3. Masa unitaria y porcentaje de vacíos del **PET**.

PESO UNITARIO AGREGADO DEL PET		
PESO DEL MEDIDOR + VIDRIO	3045	gr
PESO DEL MEDIDOR + VIDRIO + AGUA	5868	gr
VOLUMEN DEL MEDIDOR	2.823	dcm3
PEPSO DEL MEDIDOR VACIO	2557	gr
PESO DEL MEDIDOR + MATERIAL S.S.S COMPACTADO	3986	gr
PESO DEL MEDIDOR + MATERIAL S.S.S SUELTO	3806	gr
PESO UNITARIO DEL AGREGADO S.S.S COMPACTADO	506	kg/m3
PESO UNITARIO DEL AGREGADO S.S.S SUELTO	442	kg/m3

% DE VACIOS	56.8	%
-------------	------	---

Anexo C. Diseño de mezcla

El diseño de la mezcla se realizó con base a la norma American Concrete Institute (A.C.I. 211.1). Se desea construir mampostería estructural, que soporte una resistencia a compresión de 21 Mpa (3000 psi) con una relación de Agua – Cemento de 0.5. Utilizando cemento portland tipo I, con densidad de 3030 kg/m³. por lo cual, se espera una consistencia media, que corresponde a obtener un asentamiento de 5 a 8 cm.

Utilizando como referencia los datos obtenidos en, ver (Tabla 2, Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 7)

1. Resistencia del Diseño: Teniendo en cuenta la siguiente tabla.

Tabla C- 1. Resistencia promedio a la Compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra. **Fuente.** ACI 211.

Resistencia especificada a la compresión, Mpa	Resistencia promedio requerida a la compresión, Mpa
$f'_c < 21$	$f'_{cr} = f'_c + 7.0$
$21 \leq f'_c \leq 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8.3$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = 1.10f'_c + 5.0$

2. Estimación de la cantidad de Agua y Aire:

Tabla C- 2. Cantidad de agua y aire.

2. CANTIDAD DE AGUA Y AIRE		
Cantidad de agua	225	Kg/m ³
Cantidad de Aire	2	%
Vol Agua	0.225	kg
Vol Aire	0.02	kg

Se obtuvieron los datos, a partir de la siguiente tabla:

Tabla C- 3. Agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y TMN del agregado. **Fuente.** ACI 211.

ASENTAMIENTO O SLUMP [mm]		Agua en Lt/m3 de concreto para tamaños maximos de agregados gruesos							
		10 mm (3/8")	12.5 mm (1/2")	20 mm (3/4")	25 mm (1")	40 mm (1 1/2")	50 mm (2")	70 mm (3")	150 mm (6")
CONCRETO SIN AIRE INCORPORADO									
30 a 50	(1" a 2")	205	200	185	180	160	155	145	125
80 a 100	(3" a 4")	225	215	200	195	175	170	160	140
150 a 180	(6" a 7")	240	230	210	205	185	180	170	...
Cantidad aprox. de aire [%]		3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
CONCRETO CON AIRE INCORPORADO									
30 a 50	(1" a 2")	180	175	165	145	160	155	145	125
80 a 100	(3" a 4")	200	190	180	195	175	170	160	140
150 a 180	(6" a 7")	215	205	190	205	185	180	170	...

3. Calculo de la cantidad de Cemento:

Tabla C- 4. Calculo del contenido y volumen de cemento.

CANTIDAD DE CEMENTO		
cantidad de cemento	450	Kg/m3
Vol cemento	0.149	m3

4. Calculo del contenido de Agregado Grueso:

Tabla C- 5. Calculo del contenido y volumen de cemento

CANTIDAD DE GRAVA		
b/bo	0.46	
bo'	0.57014	
Vol Grava	0.262	m3

Se obtuvieron los datos, a partir de la siguiente tabla:

Tabla C- 6. Volumen de grava por unidad de volumen de concreto (b/bo). **Fuente.** ACI 211.

RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS. (f'cr)[kg/cm2]	RELACION AGUA/CEMENTO DE DISEÑO EN PESO	
	CONCRETO SIN AIRE INCORPORADO	CONCRETO CON AIRE INCORPORADO
450	0.38	...
400	0.43	...
350	0.48	0.4
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.7	0.61
150	0.8	0.71

5. Estimación del volumen de arena (Va): se calcula a partir de la siguiente ecuación.

$$V_a = 1 - (Vol. Aire + Vol. Agua + Vol. Cemento + Vol. Grueso)$$

Tabla C- 7. Volumen de Arena.

VOLUMEN DE ARENA		
Vol arena	0.344	m3

6. Tabla Resumen:

Tabla C- 8. Tabla resumen.

TABLA RESUMEN			
Material	Peso [kg]	Densidad [kg/m3]	Volumen [m3]
Cemento	450	3030	0.149
Aire	0	0	0.02
Agua	225	1000	0.225
Grava	688	2621	0.262
Arena	919	2670	0.344
	2281.578		1

7. Proporciones definitivas para 1 m³: Luego de realizar una corrección por agua, se determinan las cantidades de los materiales correspondientes para 1 m³.

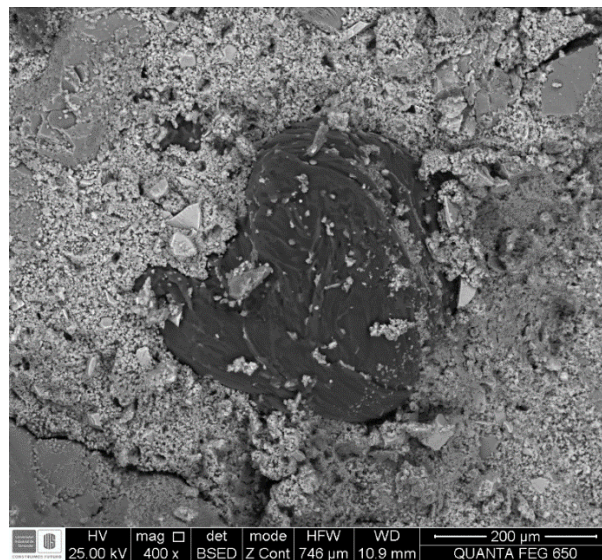
Tabla C- 9. Proporciones para 1 m³.

PROPORCIONES PARA 1 M3		
Material	Peso [kg]	Proporciones
Cemento	450	1
Agua	242	26.93
A Grueso	688	1.53
A Fino	919	2.04

Anexo D. Análisis químico de la muestra de concreto con implementación de PET mediante prueba SEM

Se realizó la prueba SEM, con el objetivo de analizar las propiedades químicas y morfológicas del PET y su comportamiento con la mezcla de concreto hidráulico.

El procedimiento consistió en que se llevaron un par de muestras, las cuales se colocaron sobre stubs metálicos con cinta adhesiva de carbón. Luego, se recubrieron con grafito en un equipo de recubrimiento Quorum 150ES. Posteriormente, se llevó a cabo el análisis químico con ayuda del Microscopio Quanta Feg 650; teniendo en cuenta que las imágenes a continuación se tomaron con un voltaje de aceleración 25Kv:



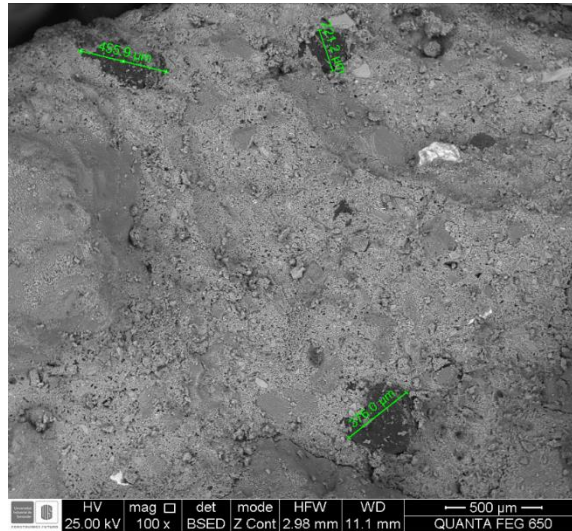
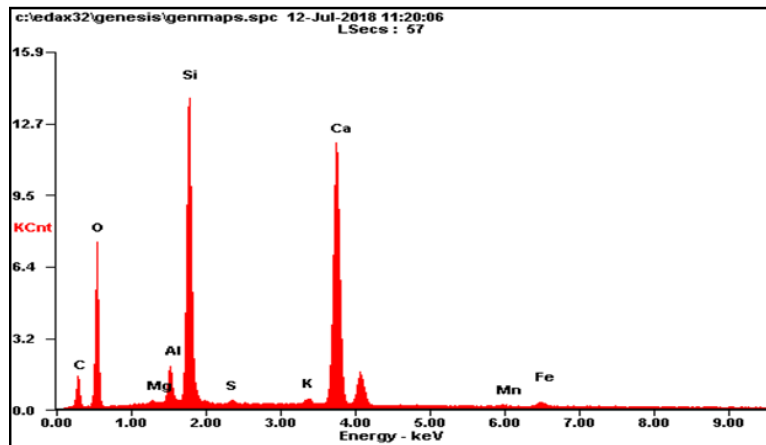


Figura D- 1. Prueba SEM. **Fuente.** Laboratorio de Microscopia, PTG-UIS.

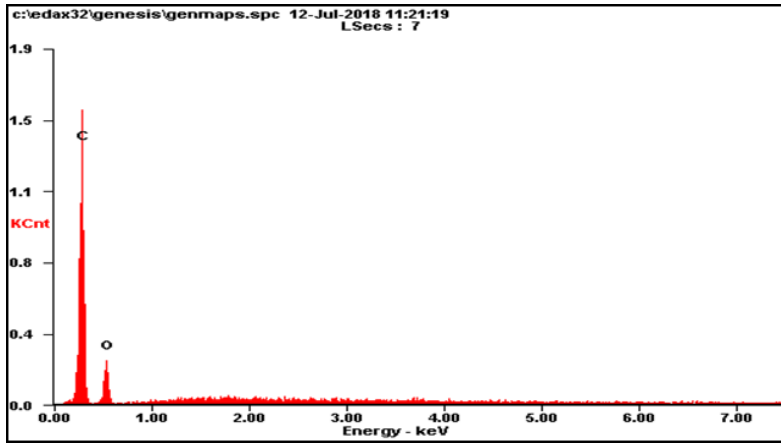
Análisis Químico y Morfológico del concreto:



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	11.89	19.86
<i>OK</i>	41.53	52.06
<i>MgK</i>	00.29	00.24
<i>AlK</i>	02.56	01.90
<i>SiK</i>	19.67	14.04
<i>SK</i>	00.28	00.17
<i>KK</i>	00.46	00.24
<i>CaK</i>	22.11	11.06
<i>MnK</i>	00.30	00.11
<i>FeK</i>	00.91	00.33
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Figura D- 2. Análisis Químico y Morfológico del Concreto Hidráulico. **Fuente.** Laboratorio de Microscopia, PTG-UIS.

Análisis Químico y Morfológico del PET:



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	71.07	76.59
<i>OK</i>	28.93	23.41
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Figura D- 3. Análisis Químico y Morfológico del PET. **Fuente.** Laboratorio de Microscopia, PTG-UIS.

Anexo E. Análisis de la implementación del PET como reemplazo del material granular fino, modificando la relación agua – cemento.

Se desea analizar el comportamiento que se obtiene al modificar la relación agua – cemento del diseño de mezcla principal (ver Anexo C), en forma inversamente proporcional, con el porcentaje sustituyente de material PET en diversas proporciones de volumen del Agregado fino (1%, 3%, 5%, 7%).

Las propiedades del PET son las mencionadas anteriormente, (Ver Anexo B). sin embargo, la Granulometría cambio, se optó, por utilizar un tamaño representativo superior, es decir, el retenido en el tamiz N°8 que pasa 100% del tamiz N°4, como se puede observar (ver Tabla x):

Tabla E- 1. Granulometría del PET # 2

MATERIAL PET #2					
PESO MUESTRA INICIAL				1000	gr
PESO MUESTRA SECA				1000	gr
TAMIZ	ABERTURA [mm]	PESO RETENIDO	% RET. PARCIAL	% RET. ACUMULAD	% PASA
3/8"	9.52	0	0	0	100
Nº 4	4.75	191.1	19.1	19.1	80.9
Nº 8	2.36	549.1	54.9	74.0	26.0
Nº 16	1.18	238.7	23.9	97.9	2.1
Nº 30	0.6	14.32	1.4	99.3	0.7
Nº 50	0.3	2.39	0.2	99.6	0.4
Nº 100	0.149	0.29	0.0	99.6	0.4
FONDO	....	4.1	0.4	100.0	0
MODULO DE FINURA				4.89	



Figura E- 1. Polietileno Tereftalato (PET), triturado tamiz #8.

A continuación, se presentarán los diferentes casos realizados:

1.) Diseño de Mezcla Convencional (0% PET)

➤ Relación Agua – Cemento

Relacion Agua - Cemento	0.52
-------------------------	------

➤ Proporciones para 1 m3

Tabla E- 2. Proporciones para 1 m3 para 0% PET.

PROPORCIONES PARA 1 M3		
Material	Peso [kg]	Proporciones
Cemento	433	1.00
A Fino	874	2.02
A Grueso	670	1.55
Agua	226	26.07

- Sustitución volumétrica de material Agregado Fino N°8 por material PET

Tabla E- 3. Sustitución Volumétrica para 0% PET.

Para 1 m3	A. Fino N° 8		PET
Porcentaje	Peso [Kg]	Volumen [m3]	Peso [Kg]

- Resultados:

Tabla E- 4. Resultados del ensayo de resistencia a compresión para 0% PET.

Ensayo Compresión - 0% PET		
Muestras	Carga [KN]	Resistencia [psi]
Cilindro 1	170.5	3165
Cilindro 2	174.8	3245
Cilindro 3	161.5	2998
Cilindro 4	180.1	3343
Cilindro 5	166.6	3092
PROMEDIO	170.7	3169

2.) Diseño de Mezcla para 1% PET

- Relación Agua – Cemento

Relacion Agua - Cemento	0.52
-------------------------	------

- Proporciones para 1 m3

Tabla E- 5. Proporciones para 1 m3 para 1% PET.

PROPORCIONES PARA 1 M3		
Material	Peso [kg]	Proporciones
Cemento	433	1.00
A Fino	874	2.02
A Grueso	670	1.55
Agua	226	26.07

- Sustitución volumétrica de material Agregado Fino N°8 por material PET

Tabla E- 6. Sustitución Volumétrica para 1% PET.

Para 1 m3	A. Fino N° 8		PET
Porcentaje [%]	Peso [Kg]	Volumen [m3]	Peso [Kg]
1	8.74	0.00346	4.63

- Resultados:

Tabla E- 7. Resultados del ensayo de resistencia a compresión para 1% PET.

Ensayo Compresión - 1% PET		
Muestras	Carga [KN]	Resistencia [psi]
Cilindro 1	161.2	2992
Cilindro 2	152.6	2833
Cilindro 3	170.6	3167
Cilindro 4	173	3211
Cilindro 5	163.5	3035
PROMEDIO	164.18	3048

3.) Diseño de Mezcla para 3% PET

- Relación Agua – Cemento

Relacion Agua - Cemento	0.47
-------------------------	------

- Proporciones para 1 m3

Tabla E- 8. Proporciones para 1 m3 para 3% PET.

PROPORCIONES PARA 1 M3		
Material	Peso [kg]	Proporciones
Cemento	479	1.00
A Fino	835	1.74
A Grueso	670	1.40
Agua	226	23.56

- Sustitución volumétrica de material Agregado Fino N°8 por material PET

Tabla E- 9. Proporciones para 1 m3 para 3% PET.

Para 1 m3	A. Fino N° 8		PET
Porcentaje [%]	Peso [Kg]	Volumen [m3]	Peso [Kg]
3	25.05	0.00991	13.26

- Resultados:

Tabla E- 10. Resultados del ensayo de resistencia a compresión para 1% PET.

Ensayo Compresión - 3% PET		
Muestras	Carga [KN]	Resistencia [psi]
Cilindro 1	172	3193
Cilindro 2	199	3694
Cilindro 3	185	3434
Cilindro 4	187.9	3488
Cilindro 5	168.2	3122
PROMEDIO	182.42	3386

4.) Diseño de Mezcla para 5% PET

- Relación Agua – Cemento

Relacion Agua - Cemento	0.43
-------------------------	------

- Proporciones para 1 m3

Tabla E- 11. Proporciones para 1 m3 para 5% PET.

PROPORCIONES PARA 1 M3		
Material	Peso [kg]	Proporciones
Cemento	523	1.00
A. Fino	797	1.52
A. Grueso	670	1.28
Agua	226	21.56

- Sustitución volumétrica de material Agregado Fino N°8 por material PET

Tabla E- 12. Sustitución Volumétrica para 5% PET.

Para 1 m3	A. Fino N° 8		PET
Porcentaje	Peso [Kg]	Volumen [m3]	Peso [Kg]
5	39.86	0.01577	21.10

- Resultados:

Tabla E- 13. Resultados del ensayo de resistencia a compresión para 5% PET.

Ensayo Compresión - 5% PET		
Muestras	Carga [KN]	Resistencia [psi]
Cilindro 1	188.8	3505
Cilindro 2	193.4	3590
Cilindro 3	195.3	3625
Cilindro 4	191.5	3555
Cilindro 5	183.2	3401
PROMEDIO	190.44	3535

5.) Diseño de Mezcla para 7% PET

- Relación Agua – Cemento

Relacion Agua - Cemento	0.4
-------------------------	-----

- Proporciones para 1 m3

Tabla E- 14. Proporciones para 1 m3 para 7% PET.

PROPORCIONES PARA 1 M3		
Material	Peso [kg]	Proporciones
Cemento	563	1.00
A.Fino	764	1.36
A.Grueso	670	1.19
Agua	226	20.05

- Sustitución volumétrica de material Agregado Fino N°8 por material PET

Tabla E- 15. Sustitución Volumétrica para 7% PET.

Para 1 m3	A. Fino N° 8		PET
Porcentaje	Peso [Kg]	Volumen [m3]	Peso [Kg]
7	53.46	0.02116	28.31

- Resultados:

Tabla E- 16. Resultados del ensayo de resistencia a compresión para 7% PET.

Ensayo Compresión - 7% PET		
Muestras	Carga [KN]	Resistencia [psi]
Cilindro 1	204.6	3798
Cilindro 2	217.5	4037
Cilindro 3	203.4	3776
Cilindro 4	215.2	3995
Cilindro 5	196.3	3644
PROMEDIO	207.4	3850

Tabla E- 17. Resultados de los ensayos de resistencia a compresión para cada tipo de % PET.

	Ensayo Compresión				
	0	1	3	5	7
Cilindro 1	170.5	161.2	172	188.8	204.6
Cilindro 2	174.8	152.6	199	193.4	217.5
Cilindro 3	161.5	170.6	185	195.3	203.4
Cilindro 4	180.1	173	187.9	191.5	215.2
Cilindro 5	166.6	163.5	168.2	183.2	196.3
Carga KN	170.7	164.18	182.42	190.44	207.4
Res. Psi	3169	3048	3386	3535	3850

Por lo tanto, se procedió a graficar los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a compresión, con el objetivo de analizar el comportamiento que se presenta al modificar el diseño de mezcla principal (**Ver Anexo C**) y la adición del porcentaje de material PET en diversas proporciones.

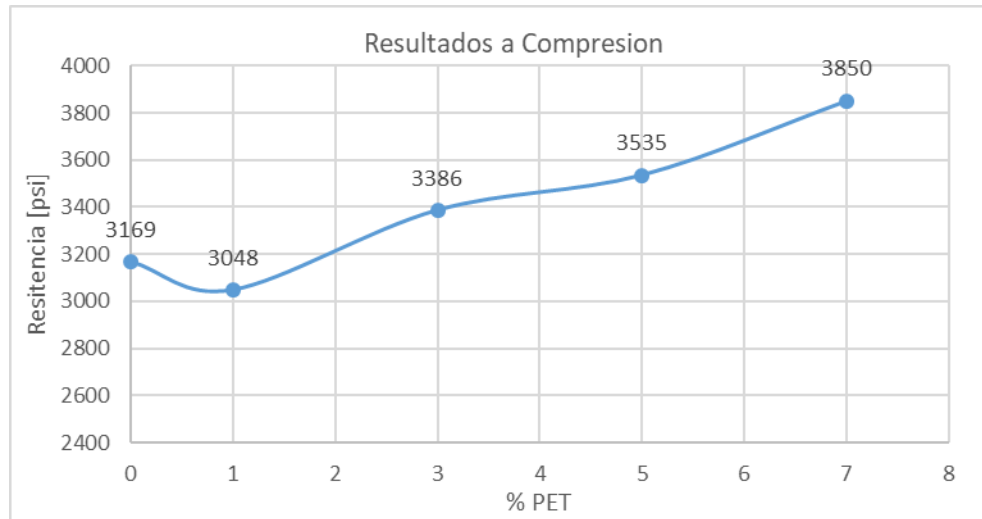


Figura E- 2. Grafica de resultados de los ensayos de resistencia a compresión versus el tipo de % PET.



Figura E- 3. Cilindro con adición de %PET triturado, retenido en el tamiz #8