

**DISEÑO Y ELABORACIÓN DE BALDOSAS PARA PISOS Y FACHADA A
PARTIR DE PET RECICLADO**

CARLOS ANDRÉS MOSQUERA SARMIENTO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO – MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

**DISEÑO Y ELABORACIÓN DE BALDOSAS PARA PISOS Y FACHADA A
PARTIR DE PET RECICLADO**

CARLOS ANDRÉS MOSQUERA SARMIENTO

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil**

Director

LUIS EDUARDO ZAPATA ORDUZ

PhD. En Ingeniería Civil

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO – MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. MATERIALES.....	12
1.1 RESINA POLIÉSTER PALATAL COP4.....	12
1.2 MONÓMERO DE ESTIRENO	12
1.3 TEREFTALATO DE POLIETILENO	13
1.4 CEMENTO HIDRÁULICO PORTLAND	13
1.5 METIL-ETIL-CETONA (MEK).....	14
2. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO.....	15
2.1 ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA	18
2.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	18
2.3 ENSAYO A FLEXIÓN	19
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	20
3.1 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (E)	20
3.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (C)	26
3.3 ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA (A)	31
3.4 ENSAYO DE RESISTENCIA AL CHOQUE	35
3.5 ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESGASTE	39
4. CONCLUSIONES	42
BIBLIOGRAFIA.....	45

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Diseños de mezcla.....	16
Tabla 2. Variación de las cantidades de resina y estireno.	20
Tabla 3. Resultados promedio de las masas inicial - 24 h en el horno - 1 h en el horno.....	31
Tabla 4. Resultados porcentaje de diferencia de la masa ideal – masa de ebullición - porcentaje de absorción de agua.....	32

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Granulometría obtenida para RPET.....	13
Figura 2. Resultados promedio para los diferentes diseños de resistencia a compresión.	20
Figura 3. Resultados promedio de la carga soportada por las muestras - requerimiento para cumplimiento de la norma NTC - 1085.....	26
Figura 4. Porcentaje de absorción de agua - comparación con el requerimiento de norma.....	33
Figura 5. Alturas máximas promedio - requerimiento de la norma.....	36
Figura 6. Resultados promedio longitud de las huellas y requerimiento de norma.	40

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y ELABORACIÓN DE BALDOSAS PARA PISOS Y FACHADA A PARTIR DE PET RECICLADO*

AUTOR: CARLOS ANDRÉS MOSQUERA SARMIENTO**

DESCRIPCIÓN:

En esta investigación se realizó un estudio sobre mezclas de mortero polimérico constituido por tereftalato de polietileno reciclado (RPET, por sus siglas en inglés), cemento portland (CP) y resina poliéster palatal COP4 diluida con estireno. Estos diseños se hicieron con el fin de fabricar baldosas de cemento en conjunto con estos materiales y a su vez, lograr un aprovechamiento en conjunto de las propiedades físicas y mecánicas que poseen estos materiales. Los diseños de mezcla se basaron en el método volumétrico. La composición de la mezcla está dividida en 5 diferentes diseños controlados de la siguiente forma: diseño I: 100%CP – 0%PET, diseño II: 0%CP – 100%PET, diseño III: 40%CP- 60%PET, diseño IV: 25%CP – 75%PET y diseño V: 10%CP – 90%PET. Además de esto, se hizo una variación de mezcla en todos los 5 diseños anteriores entre la resina y el estireno, los cuales variaron entre 20 – 70% y 30 – 80%, respectivamente, con el objeto de estudiar la influencia de estos componentes en los resultados obtenidos para la mezcla final. De igual forma se realiza una comparación con los requerimientos exigidos por la NTC 1085, dejando en evidencia el excelente comportamiento e interacción entre las partículas de RPET y el cemento, al ser combinados con resinas de tipo poliéster. Siguiendo procedimientos estadísticos tipo ANOVA se estudiaron los efectos en compresión, flexión, choque, desgaste y absorción de agua entre las 3 variaciones en la proporción resina/estireno en cada uno de los 5 diseños de mezcla propuestos, así como diferencias a su vez entre los 5 diseños de mezcla. Como resultado final, se define como diseño de mezcla adecuado el diseño V: 10% CP – 90% RPET, con 70%Resina – 30%Estireno.

PALABRAS CLAVE: Mortero polimérico, tereftalato de polietileno reciclado, RPET, Propiedades mecánicas: resistencia a la flexión, compresión, y choque.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz, PhD. En Ingeniería Civil

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND MANUFACTURE OF TILES FOR FLOORS AND FACADE FROM RECYCLED PET*

AUTHOR: CARLOS ANDRÉS MOSQUERA SARMIENTO**

DESCRIPTION:

The present research work consisted in investigating polymeric mortar mixes with recycled polyethylene terephthalate (RPET), portland cement (CP, for its acronym in spanish), and COP4 palatal polyester resin diluted in styrene. The aimed of the research consisted in fabricating cement tiles with the idea to enhance the physical and mechanical properties of the final composite material. The mix designs were based on the volumetric method. There were 5 different mixes: design I: 100%CP – 0%PET, design II: 0%CP – 100%PET, design III: 40%CP- 60%PET, design IV: 25%CP – 75%PET, and design V: 10%CP – 90%PET. Also, for research purposes all 5 designs it was investigated variations in resin and styrene among 20 – 70% and 30 – 80%, respectively. In the same way, a comparison is made with the requirements of NTC 1085, showing the excellent behavior and interaction between the particles of RPET and the cement, when combined with resins of polyester type. Using statistical procedures (ANOVA) these proposed effects in compression, flexion, shock, wear and water absorption between the 3 variations in the proportion of resin/styrene at each of the 5 mix designs, as well as differences were studied in turn among the 5 mix designs. As a final result, is defined as mixture design suitable design V: 10% CP - 90% RPET, with 70% resin - 30% styrene.

KEYWORDS: CLAVE: Polymer mortar, tereftalato of polyethylene recycled RPET, mechanical properties: resistance to bending, compression, and shock-

* Degree work

** Faculty of Physical - Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz, PhD. In Civil Engineering

INTRODUCCIÓN

La producción de residuos sólidos en Colombia es considerablemente mayor a la cantidad que se reciclan, siendo comúnmente el relleno sanitario la disposición final de los mismos, de este modo se desaprovecha la posibilidad de tener una reducción en sus volúmenes [1]. En el año 2015 alrededor de sólo un 26% de los envases de tereftalato de polietileno (PET, por sus siglas en inglés) fueron reciclados y/o reutilizados, dejando un 74% de la cantidad total de estos depositados en rellenos sanitarios [2]. Estos datos dejan en evidencia la poca implementación de tecnologías que favorezcan la obtención de materias primas para la fabricación de nuevos productos a partir del mismo.

El PET es un polímero termoplástico que ¹pertenece a la familia del poliéster, familia a la cual se le da uso en la industria de las fibras, películas, empaques, botellas y envases [3]. En el año de 1941 fue patentado en Inglaterra como polímero para fibra por J. R. Whinfield y J. T. Dicknson [5]. A comienzos del año de 1976 se le comienza a dar un uso al PET para fabricación de envases ligeros, transparentes y resistentes, aunque ha tenido mayor desarrollo en la industria de los empaques para productos alimenticios y bebidas [5]. Debido a la gran demanda de este tipo de polímero se ha generado una gran preocupación en los ambientalistas respecto al manejo de sus residuos, dando como alternativa de solución a este problema el reciclado del material [4]. El tereftalato de polietileno reciclado, y que por medio de un proceso

¹ Rodríguez R. Sara C., Residuos Sólidos en Colombia: Su manejo es un compromiso de todos, L'esprit Ingénieur 2, Vol. 2, Num. 1, 201. pp 92-93.

² Suarez, Daniel, Sólo el 26% de las botellas plásticas se recicla, La República. [Base de datos en línea]. jueves, marzo 10 de 2016, http://www.larepublica.co/solo-26-de-las-botellas-pl%C3%A1sticas-se-recicla_357536

³ Gamma campillo, Lilia, Reciclado de Polietileno Tereftalato (PET) Diversas Opciones, EN Revista de Divulgación, División Académica de Ciencias Biológicas, Volumen XVII, Número 32, enero-junio 2011, pp 5-6.

⁴ DISECLAR, diseño y fabricación ecológica, Empresa Colombiana, Cali. < <https://diseclar.wordpress.com/>>

⁵ Sánchez M., Rosales A., Maldonado H. (enero-marzo 2011). Estudio de catalizadores en la degradación de PET reciclado. Ciencia UANL. Vol. XIV (1), pp 39.

mecánico es pulverizado para obtener partículas las cuales se emplean para este estudio en tamaños de tamiz #16 hasta #200. Estudios han demostrado que el RPET posee un módulo de elasticidad menor a comparación del PET en estado virgen, mayor elongación a la rotura y mayor resistencia al impacto, es decir, mayor resiliencia y además mejoras en la ductilidad [6]. Como aglutinante se utiliza resina poliéster la cual tiene su dosificación especificada en la Tabla 1. La resina poliéster es un tipo de resina que tiene como propiedad ser resistente a altas temperaturas, excelente resistencia a la corrosión y baja absorción de agua [7]. El disolvente que se usó para reducir la viscosidad de la resina fue monómero de estireno. El monómero de estireno es un líquido incoloro o amarillento, se oxida en presencia de luz o aire. Es un producto comercial el cual se emplea en la obtención de poliestireno, el cual es usado para fabricar juguetes, equipos deportivos entre otros [17]. En este ensayo se realizó una serie de diseños en los cuales la variación de estireno en cada uno fue uno de los agregados a tener en cuenta en el análisis de los resultados obtenidos.²

⁴ DISECLAR, diseño y fabricación ecológica, Empresa Colombiana, Cali. < <https://diseclar.wordpress.com/>>

⁶ Quintero L. Diseño de una planta de reciclado de Tereftalato de polietileno (PET). Universidad politécnica de Valencia. Valencia, España.

⁷ Besednjak A. (2005), *Materiales compuestos proceso de fabricación de embarcaciones*, Barcelona-España, Ediciones UPC, pp 27-28.

¹⁷ Lopez, Blanca, Perez, Beatriz, Mora, Josefina, "Influencia de determinados polimorfismos de enzimas metabólicas en la genotoxicidad del estireno", *Genotoxicidad del estireno*, Vol. 70, Núm. 1, 2004, pp 95 - 123.

1. MATERIALES

1.1 RESINA POLIÉSTER PALATAL COP4

Es una resina poliéster insaturada, la cual es de reactividad media y alta viscosidad. Entre sus propiedades en estado líquido se encuentra su densidad con un valor de 1.1 g/ml, estable y no se endurece en un tiempo de 6 meses, bajo una temperatura de 25 °C. Entre las propiedades de la resina ya endurecida sin ningún tipo de carga adherida, se encuentran la resistencia a la tracción de 70 MPa según ensayo DIN 53 455, resistencia a la flexión de 110 MPa según ensayo DIN 53 452. [12]. Entre sus aplicaciones se encuentran el uso de todo tipo de productos reforzados con fibra de vidrio, tales como perfiles, lanchas, carrocerías, mangos de cuchillo, paraguas, encapsulación de artículos de decoración, ensamblajes electrónicos, botones concreto polimérico, muebles, paneles, entre otros. [10] las cantidades de resina utilizadas se observan en la Tabla 1.

1.2 MONÓMERO DE ESTIRENO³

Es un agente disolvente para las resinas poliéster y viniléster, su uso en exceso en las mezclas con resinas de tipo poliéster puede generar baja resistencia a la intemperie. Además de esto, en elementos de tipo laminar los cuales contienen exceso de estireno al ser expuestos al sol pueden presentar posibles fisuras en la superficie, sin embargo, algunas resinas poliéster permiten que la presencia de estireno sea de hasta un 50% de disolvente [13]. La cantidad de estireno empleada en este estudio se especifica en la Tabla 1.

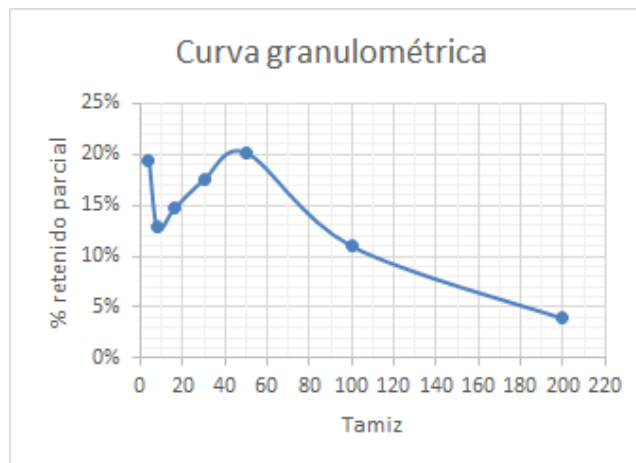
¹⁰ Arroyo M. Carla V.; Loyo D. Carlos, "Diseño de una planta para la producción de polimetilmetacrilato y baldosas de resina poliéster insaturada reforzados con la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos de computadoras desechadas", trabajo de grado, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, 2015, pp 21-26.

¹² Palatal COP4. Empresa motorex. Disponible: <http://www.motorex.com.pe/producto/resina-de-poliester-palatal-co-p4>.

1.3 TEREFTALATO DE POLIETILENO

Es un polímero virgen derivado del petróleo, por medio de policondensación entre ácido Tereftálico y etilenglicol. El cual es utilizado ampliamente en la industria de los frascos o envases plásticos para bebidas. Entre sus propiedades están incoloro, bajo peso, tacto agradable, y alta resistencia a la degradación biológica [14]. Para este proyecto se emplearon botellas de plástico tipo PET trituradas con tamaño de grano comprendido desde tamiz #16 hasta pasa 200, mostrada en la Figura 1 de igual forma la cantidad de RPET requerido para fabricar las muestras de este estudio se especifican en la Tabla 1.⁴

Figura 1. Granulometría obtenida para RPET



1.4 CEMENTO HIDRÁULICO PORTLAND

El cemento que se utilizó fue tipo portland, el cual está diseñado para uso en pasta o lechada de cemento para acabados, igualmente se utiliza para preparación de

¹³ Carrasco T. Egida; Influencia de la concentración del peróxido de benzoilo y de la temperatura del ambiente en el tiempo inicial de gelificación de una resina poliéster insaturada; Tesis de pregrado; Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo; Lambayeque – Perú; 2016.

¹⁴ Vences U. Isabel; Evaluación del proceso de conversión de PET estándar i biodegradable en resina líquida, mediante glicosil; tesis de grado; Universidad Veracruzana; Facultad de ciencias químicas; Xalapa Enríquez; México; 2015.

morteros. Su resistencia a la compresión luego de 3 días de curado es de 8 MPa y luego de 24 días de curado es de 26 MPa. [16]. El porcentaje de cemento utilizado para cada diseño en este ensayo se especifica en la Tabla 1.

1.5 METIL-ETIL-CETONA (MEK)

5

Es el agente reactivo, el cual inicia el proceso de gelificado y curado de la mezcla una vez se ha agregado el octoato de cobalto, por medio de una reacción exotérmica, con la cual se obtiene el endurecimiento de la resina. El MEK es una cetona, muy inflamable y relativamente volátil, por lo tanto, es recomendado usarse en sitios con temperatura ambiente. Entre sus propiedades toxicológicas se encuentra la facilidad de absorción por vía respiratoria, de igual forma, pero en menores cantidades también es absorbida por vía dérmica y oral, su eliminación del cuerpo humano es por medio de la orina, por lo tanto, es indispensable seguir las recomendaciones de uso que se obtienen de la ficha técnica de este producto [15].

¹⁶ Cemento por kilogramo de argos. Argos. disponible: <http://grandesrealidades.argos.co/argos-introduce-saco-de-cemento-gris-de-1-kilo/>

¹⁵ Metiletilcetona. Gobierno de España. Ministerio de empleo y seguridad social. instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. disponible: <http://desengrase.insht.es/sustancias/metiletilcetona-mek.html>. (25-07-2017).

2. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO

El primer paso que se lleva a cabo en el diseño y fabricación de las baldosas a partir de RPET reciclado es el de realizar un diseño de mezcla, en el presente caso se hizo por medio del método volumétrico, para lo cual se requiere una serie de datos específicos de cada agregado los cuales se pueden obtener mediante ensayos estipulados en las normas NTC o por medio de los fabricantes de productos.

La caracterización de las partículas de RPET se realiza a partir del ensayo especificado en la norma NTC-237 (Método para determinar la densidad y absorción del agregado fino) [18], e igualmente del ensayo NTC-221 (Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico) [19]. Para los valores de las densidades de la resina y el estireno se solicitaron las fichas técnicas de estos dos productos al fabricante.

El proceso para la obtención del RPET en los tamaños de tamiz #16 hasta el tamiz #200 se realiza con una máquina la cual lleva a cabo el proceso de transformación iniciando con el ingreso de las botellas y luego llegando a los tamaños requeridos para la producción de las muestras de acuerdo con cada uno⁶ de los ensayos que se realizan por medio de un mecanismo de pulverización.

Se estipula la variación de agregados según diseños, en este caso los diseños presentes se manejaron desde una relación fija de 60% Resina-Estireno y 40% de Cemento-RPET, de la cual en el 40% de la mezcla (Cemento-RPET) se varía entre sí los porcentajes de sus componentes para un total de 5 diseños de la siguiente

¹⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Método para determinar la densidad y absorción del agregado fino, Editada 2001-07-23. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC. 13 p. NTC 237.

¹⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Cementos. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico, Editada 1999-07-28. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC. 8p. NTC 221.

manera: 40% Cemento - 60% RPET; 25% Cemento - 75% RPET; 10% Cemento - 90% RPET; 0% Cemento - 100% RPET; 100% Cemento - 0% RPET, identificados respectivamente como I, II, III, IV y V. Para el 60% (Resina-Estireno) restante se varían los componentes de la siguiente manera: 20% Resina - 80% Estireno; 50% Resina - 50% Estireno; 70% Resina - 30% Estireno, identificados respectivamente como Tipo a, Tipo b y Tipo c. Como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Diseños de mezcla

Diseño/Tipo	Tipo a	Tipo b	Tipo c
	20%R - 80%E	50%R - 50%E	70%R - 30%E
I	100% Cemento - 0% RPET		
II	0% Cemento - 100% RPET		
III	40% Cemento - 60% RPET		
IV	25% Cemento - 75% RPET		
V	10% Cemento - 90% RPET		

- Realizar el diseño volumétrico, para ello primero se determinan las dimensiones de la muestra que se va a producir, una vez obtenido el volumen de esta muestra se calcula la cantidad de cada uno de los agregados en porcentaje de acuerdo con el volumen total de la muestra y a la relación cemento/RPET y resina/estireno según diseño de mezcla, luego de obtenido el valor en porcentaje se determina el volumen necesario para cada componente.
- Obtenido el RPET en los tamaños adecuados, se mide la cantidad de cada uno de los compuestos de los diferentes diseños de mezcla, para ello:
- Se obtienen las cantidades de resina, se disuelve totalmente la resina en el contenido de estireno de manera controlada, ya sea vertiendo la resina en el estireno o viceversa con la ayuda del agitador de vidrio el cual no permite que se generen burbujas de aire en la solución.
- Agregar el acelerador de curado (octeto de cobalto), el cual se determinó usar una cantidad del 0.5% de la masa total de la solución entre resina y estireno.

- Con la solución pre-acelerada, se toman las cantidades de agregados que dependen del tipo o diseño de mezcla.
- Mezclar entre sí todos los agregados por medio de una mezcladora manual helicoidal, que para esta investigación fue adaptada teniendo como guía la mezcladora helicoidal de concreto, que por medio de un instrumento electrónico de velocidad controlable se adecua la pieza de forma helicoidal. De este modo se llevó a cabo la mezcla entre agregados y el aglutinante que en este caso es la resina y el estireno. Para cumplir con las dimensiones especificadas en la NTC-1085 para los ensayos de absorción de agua, resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, resistencia al impacto y desgaste fue necesario producir esta pieza o cabeza de forma helicoidal, ya que en la maquinaria existente el desperdicio de material era excesivo y esto podría tener repercusiones al momento de verter la mezcla en el molde y no lograr cumplir con el volumen que se determinó.
- Con la mezcla homogénea, se agrega el acelerador (MEK) que inicia la reacción química y genera el endurecimiento de la resina y con esto el endurecimiento de toda la mezcla. La cantidad de acelerador necesario para el endurecimiento de la mezcla en poco tiempo se estipuló que fuese el 1.5% del peso total de la solución de resina y estireno, basado en las recomendaciones dadas en la ficha técnica de cada producto y una serie de ensayos de variación de este porcentaje en el diseño de mezcla hasta obtener un tiempo de endurecimiento de aproximadamente 20-25 minutos, y el tiempo de post-curado de aproximadamente de 8 días [8].⁷

⁸ Catalizadores y Acelerantes, PQ representaciones, Nuble 324 Santiago, www.pq.cl

2.1 ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA

Luego de llevar a cabo el proceso estipulado en la NTC-1085, el coeficiente de absorción de agua de cada probeta es calculado con la ecuación:

$$A = \frac{P2-P1}{P1} \times 100 \quad (1)$$

Dónde:

A = coeficiente de absorción de agua expresado en porcentaje.

P2 = masa final de la probeta.

P1 = masa constante de la probeta.

De acuerdo a la NTC-1085, el porcentaje de absorción de agua de cada probeta debe ser menor al 7%, y el valor final del ensayo, se obtiene calculando la media aritmética de los resultados obtenidos para 3 probetas que se fabricaron en cada uno de los diferentes diseños de mezcla (Tabla 1), los cuales contienen 3 diferentes relaciones Resina/Estireno, para un total de 45 probetas, los resultados se pueden observar en la Tabla 1 y la Figura 1.

2.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Para cada uno de los diseños de mezcla se crean probetas de acuerdo al procedimiento mencionado en la norma NTC-1085 para el ensayo de resistencia a la compresión. Una vez fabricadas las probetas se les deja secar el pegante entre baldosas como mínimo 7 días, y luego se procede a someter las probetas a la falla.

Para determinar el valor de la resistencia a la compresión se emplea la siguiente ecuación:

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

C= Resistencia a la compresión.

W = Carga máxima indicada por la máquina.

A = Promedio de las superficies totales de las cargas superior e inferior de la probeta cúbica

Para dar cumplimiento a lo requerido en la norma NTC-1085, el valor mínimo individual para las probetas es de $13,5 \frac{N}{mm^2}$, y en promedio el valor mínimo es $15 \frac{N}{mm^2}$, el total de muestras fabricadas para este ensayo fue de 150 unidades.

2.3 ENSAYO A FLEXIÓN

Para efectuar este ensayo se fabricaron muestras con dimensiones de 200 x 200 x 8 mm acorde a lo estipulado en la norma NTC-1085. Se procede a determinar el valor individual y el valor promedio de la resistencia a la flexión de las probetas, y se chequea el cumplimiento de lo requerido por la NTC-1085, la cual especifica que para flexión se requiere individualmente un valor de 950 N, o 95 Kg, y el valor promedio para darle el cumplimiento a la norma es de 1100 N o 110 Kg. La cantidad de muestras que se fabricaron para realizar este ensayo fue de 5 muestras por cada diseño, para un total de 75 muestras.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (E)

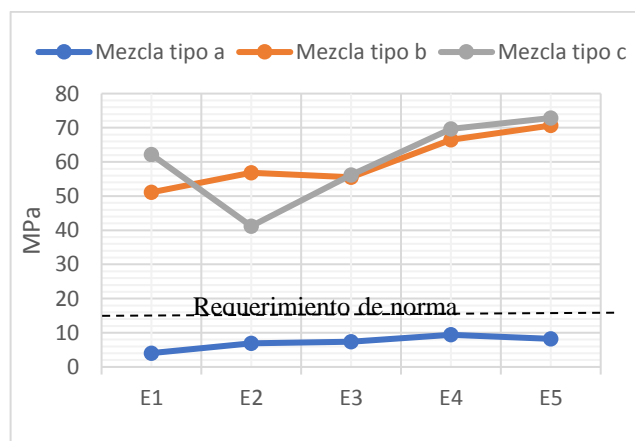
Este ensayo se realizó siguiendo los requerimientos de la NTC-1085 “Ensayo de resistencia a la compresión”. Llevando a cabo la variación en los cinco diferentes diseños E1, E2, E3, E4 y E5 con las cantidades de resina y estireno registrados en la Tabla 2, estas son constantes para todos los demás ensayos.

Tabla 2. Variación de las cantidades de resina y estireno.

Tipo a:	20% resina	–	80% estireno.
Tipo b:	50% resina	–	50% estireno
Tipo c:	70% resina	–	30% estireno.

En la Tabla 2 se presentan los resultados promedio de los ensayos de resistencia a la compresión para los diferentes diseños de mezcla y sus combinaciones. Seguido a esta Tabla se presenta la Fig2 la cual deja evidenciar los resultados promedio comparados con lo requerido por la norma NTC-1085.

Figura 2. Resultados promedio para los diferentes diseños de resistencia a compresión.



Para las muestras E1a los valores obtenidos no cumplen con el requerimiento de la NTC-1085. Esto es debido a que en la mezcla hubo una baja presencia de resina y una alta presencia de estireno, además la mezcla de mortero polimérico es generada por la interacción de la resina con el cemento, que en este caso al ser tan baja la cantidad de resina, fue poca la entrega de propiedades que se obtiene al respecto de este tipo de concretos.

Otra de las razones por las cuales se presentó ese comportamiento fue debido a la evaporación del estireno al momento de endurecerse la mezcla, que se presentó en esta investigación, de este modo deja poca reacción del cemento con la resina, y junto a la evaporación de este, se genera una respuesta muy baja de resistencia a la compresión como se evidencia en la Figura 2 [10].⁸

Caso contrario a las muestras E1a, se puede decir que en las muestras E1b los valores obtenidos se encuentran con un resultado superior al requerido por la norma. Se puede evidenciar la gran participación y entrega de propiedades que empieza a ejercer la mezcla entre el cemento y la resina, ya que se logra ver una compensación de propiedades mecánicas a medida que los agregados generan mejor adherencia entre sí.

Los valores obtenidos para resistencia a la compresión superan a los requerimientos de la norma con una diferencia de 36.1 MPa, sin embargo, este diseño de mezcla, aunque cumple con los requerimientos para la resistencia a la compresión, no cumple ninguna función de contribución con el medio ambiente, ya que no contiene agregado RPET, por lo que en la presente investigación se descarta este diseño para hacer parte de los diseños de mezcla que se consideran adecuados.

¹⁰ Arroyo M. Carla V.; Loyo D. Carlos, "Diseño de una planta para la producción de polimetilmetacrilato y baldosas de resina poliéster insaturada reforzados con la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos de computadoras desechadas", trabajo de grado, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, 2015, pp 21-26.

Para la muestra E1c se obtuvo un valor promedio de 62.15 MPa, lo cual permite identificar que al existir más resina que estireno, la interacción entre el cemento y la resina fue adecuada. Sin embargo, este no contiene agregado RPET, por lo que en la presente investigación tampoco es considerado como un diseño adecuado para la fabricación de las baldosas.

En las muestras E2a se evidencia una baja resistencia a la compresión en respecto a los demás diseños de mezcla, debido a la presencia en gran cantidad de estireno comparada con la de resina, las partículas de RPET al tener tamaños tan pequeños generan una reacción de estos con la resina, sin embargo la poca presencia de esta deja en evidencia la pérdida de adherencia entre partículas, de modo tal que el RPET entrega sólo una parte de sus propiedades a la mezcla, esto sucede a una temperatura de alrededor de los 45°C y los 50°C, sin embargo una vez endurecida la mezcla al ser 100% RPET no se presenta ninguna alteración o deformación en la muestra, por otra parte al no cumplir con lo requerido por la NTC-1085, se descarta este diseño.

En el caso de las muestras E2b, se observa el aumento en la resistencia a compresión de este diseño de mezcla, debido a que la proporción de resina y estireno es igual, en comparación con la muestra E2a, dejando como evidencia un aumento en la interacción entre partículas de RPET y resina, donde se puede comprobar que la adherencia de partículas fue mayor.

En este caso las propiedades mecánicas de la resina se modifican según el comportamiento que adquiera la carga que termina siendo el RPET en tamaños tales que estos sufren una reacción en cuanto se inicia el proceso de endurecimiento de la resina, dando como resultado una transformación de materiales en procesos inversos, es decir, la resina se encuentra en estado líquido y para pasar al estado sólido esta libera energía en forma de calor lo que se conoce

como reacción exotérmica [20]⁹, y por el contrario el RPET es un material al cual en los procesos de extrusión se les aplica calor a altas temperaturas externas, debido al tamaño de las partículas que se emplean, dando como resultado la transformación de estas en nuevos materiales[21]. En este proceso, ocurre algo similar, ya que la energía liberada de la reacción química generada entre la resina, el estireno, el cobalto, y el MEK, alteran la forma de las partículas de RPET, las cuales son tan pequeñas que no requieren de altas temperaturas como se puede evidenciar en este diseño [11].

En las muestras E2c se evidencia una superioridad en comparación con lo requerido por la NTC-1085 de 26.2 MPa, esto debido a que el cemento tiene la propiedad de ser resistente a la compresión, es decir, aporta un poco de esta resistencia frente a la pérdida en la resina de la misma.

Ahora en comparación con la muestra E2c quien presenta una baja resistencia a la compresión respecto a la muestra E2b, la diferencia se debe a la gran cantidad de resina mezclada con el RPET, que reaccionó de modo tal que las propiedades de esta se vieron influenciadas en menor proporción por el RPET ya que la mezcla evidencia que algunos tamaños de las partículas no alcanzaron a transformarse adecuadamente, debido a que el tiempo de curado de estas muestras fue corto. Para esto fue necesario implementar una herramienta con la cual se buscó liberar las burbujas de aire que se pudieran generar durante el proceso de vertimiento de la mezcla en el molde, este es un proceso que requiere de precisión para ser realizado, de lo contrario es posible que la mezcla empiece a presentar endurecimientos durante la transición al estado gel, dejando pequeñas

²⁰ Jaramillo L, Patiño I, "Selección de resinas de poliéster insaturado para procesos de transferencia de resina en molde cerrado", Artículo de investigación, Núm. 28, julio, 2012, pp 109 - 127.

²¹ Juárez M., Santiago M; Vera J, "Estudio de la factibilidad para la manufactura de empuñaduras de PET reciclado", Vol. 9, Núm. 2, 2011, pp 1 - 12.

¹¹ Valencia, Mayra E.; Collazos, Paola A.; Mina, José H.; Toro, Edwar F.; Caracterización físico mecánica de concreto polimérico basado en resina poliéster, Revista científica Guillermo de Ockham, Vol 8, núm. 1, enero-junio;2010, pp 84-92.

aglomeraciones de partículas en las muestras que no se pueden identificar a simple vista, por ende se puede decir que en el proceso de fabricación de las muestras se puede determinar que la pérdida de resistencia en comparación con la mezcla anterior, es causado por la poca maleabilidad en la mezcla.

En el diseño de mezcla E3a es evidente la pérdida de propiedades por causa de la gran presencia de estireno, como ha ocurrido en los ensayos anteriores en las muestras de este tipo, específicamente las E1a y E2a que son muestras que también presentaron una baja resistencia a la compresión (Fig. 2). Sin embargo, en este ensayo se evidencia un aumento en la resistencia al mezclarse estos dos agregados entre si y generarse una reacción con la poca resina presente en la mezcla y al mismo modo una mezcla de mortero en la cual se sustituye el agregado de arena por partículas de RPET, en donde se puede evidenciar que su resistencia a la compresión aumentó al tener los dos componentes presentes en la mezcla y con esto lograr generar una adecuada interacción entre ellos. Este diseño de mezcla a pesar de aumentar su resistencia a la compresión, no es suficiente para cumplir con los requisitos de la norma NTC-1085, por lo tanto, se descarta como un posible diseño de mezcla adecuado.

Por el contrario, al observar la mezcla E3b se puede observar un aumento de 40.5 MPa en la resistencia a la compresión en comparación con lo requerido con la norma, esto cataloga esta muestra como una de las posibles mezclas adecuadas para la fabricación y diseño de baldosas para piso y fachada a partir de RPET reciclado, sin embargo, su proporción de RPET-cemento no es suficiente para generar una gran cantidad de material reciclado.

En el diseño E2c se presentó una diferencia de resistencia de 26.2 MPa con respecto a lo requerido por la norma, en la muestra E3c se tiene un aumento de 41.15 MPa, lo que indica que la presencia de mayor resina que estireno genera una diferencia en las mezclas debido a la pérdida y compensación de propiedades que

realizan las cargas como lo son el cemento y el RPET en las soluciones de resina y estireno, los cuales en la mezcla E3b, presentaron una diferencia mínima con respecto a los resultados obtenidos en la muestra E3c, de tan solo 0.65 MPa.

Los resultados promedio para las muestras del ensayo E4a presentan un aumento de 2.0 MPa con respecto a los obtenidos en las muestras inmediatamente anteriores, catalogando esta como la mezcla en proporción de mayor resistencia entre las mezclas del tipo a, las cuales contienen una cantidad de estireno mayor que la cantidad de resina, pero ninguna de las muestras logró superar los valores requeridos por la norma (Fig. 2).

Los resultados obtenidos por las mezclas E4b y E4c presentan una diferencia entre sí de tan solo 3,2 MPa, lo cual deja en evidencia que entre los diferentes diseños de mezcla se obtiene una respuesta de máxima resistencia a la compresión de 69.7 MPa (Fig. 2), dado que entre estos dos diseños de mezcla solo varía la cantidad de resina y estireno, siendo esta diferencia una muestra de la poca variación que se empieza a presentar debido a ellos en la resistencia a la compresión, que permiten determinar realmente qué tanto beneficio o mejora aporta el uso de resina en grandes cantidades para este ensayo.

Finalmente observando la muestra E5a, es importante resaltar la pérdida de la resistencia a la compresión en comparación con la mezcla E4a se debe a que solo se encuentra con un 10% de cemento, mientras que lo restante es RPET, a lo cual se puede decir que aunque el estireno se evapora en la mezcla, este reacciona con el cemento, el cual entrega propiedades de resistencia a la compresión, por lo tanto, aunque la muestra no cumple con el requerimiento de la norma (Fig. 2), es de reconocer a los agregados como a la resina su aporte en propiedades.

Otro caso en el cual se realiza un análisis es en la mezcla E5b, la cual presenta iguales proporciones de resina y estireno, y una cantidad mayor de RPET, en la cual

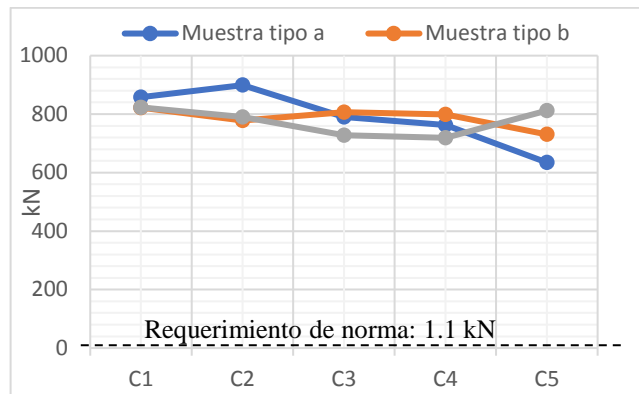
la diferencia con respecto a la mezcla E4b es de 4,15 MPa al alza, dejando claro que el RPET es un material que entrega propiedades muy altas en compresión comparado con el diseño E1b, E2b, y E3b, debido a la adecuada interacción química entre las partículas de cemento y las de RPET, fenómeno que ocurre durante el tiempo en el que la resina empieza la reacción exotérmica en la cual la energía liberada en forma de calor es absorbida por las partículas de RPET [20], las cuales sufren un cambio de estado y se mezclan de manera homogénea con las pequeñas partículas de cemento, dejando como resultado final un material de alta resistencia a la compresión y bajo consumo de materias primas como cemento, y alto consumo de materiales reciclados como RPET. Esta muestra se puede catalogar posiblemente como la mezcla más adecuada para la resistencia a la compresión (Fig. 2).

En la mezcla E5c, se evidencia un aumento de 2.2 MPa, el cual representa el aumento de la resina respecto al estireno. Sin embargo, a medida que aumenta la cantidad de estireno presente en la mezcla, se va obteniendo una pérdida de propiedades. Como en este caso la cantidad presente de estireno en la mezcla fue mínima, se observa un aumento en las propiedades de resistencia a la compresión de la mezcla E5c, que, aunque no es considerable, deja claro que la resina al igual que el RPET y el cemento, son componentes que determinan el comportamiento de la mezcla.

3.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (C)

A continuación, en la Figura 3 se presentan los resultados promedio de los ensayos realizados para las 5 muestras para la resistencia a la flexión, los cuales se comparan con lo requerido por la norma NTC 1085.

Figura 3. Resultados promedio de la carga soportada por las muestras - requerimiento para cumplimiento de la norma NTC - 1085.



Para el ensayo de resistencia a la flexión, se evidencia la gran diferencia que existe en promedio en los tres tipos de muestra con respecto a lo requerido por la norma NTC-1085, es de resaltar que las deformaciones en estos diseños fueron muy pequeñas, tales que no lograron alcanzar 1 mm de deflexión, por lo que es evidente que el cemento cuando se mezcla con agua, posee poca resistencia a la flexión; cosa contraria sucede en estos diseños en donde se evidencia que la interacción entre el cemento y la resina fue de una manera tal que su diferencia con respecto a la norma fue alrededor de los 800 kN, sin embargo este diseño (E1a), se descarta por no tener ningún tipo de presencia de partículas de RPET.

Los resultados promedio de las muestras, revelan la poca deflexión que sufre la mezcla C2a en comparación con las mezclas C2b y C2c las cuales cuentan con una diferencia de deflexión de 0.013 mm y 0.014 mm respectivamente, en donde se muestra que, aunque las muestras con contenido de poca resina presentan baja resistencia a la compresión, en este caso representan una alta resistencia a la flexión, por lo tanto, aunque estas muestran una excelente respuesta frente a lo requerido por flexión se descartan los ensayos en los cuales la presencia de estireno es mayor que la de resina por no cumplir con los requisitos de la norma.

De las muestras C2b y C2c, es evidente que, aunque sean solamente 100% RPET, su superioridad de resistencia a la flexión en comparación con lo requerido por la norma es alrededor de los 700 kN por encima de lo solicitado, sin embargo, en este

ensayo se descarta la posibilidad de ser una mezcla adecuada debido a la baja maleabilidad que se presenta, esto en la mezcla C2c, de igual manera se descarta por el costo de producción debido a la gran cantidad de resina presente. Por otra parte, las muestras C2b se podrían considerar como una mezcla adecuada, sin embargo, se descarta por su alto consumo de resina y estireno ya que este diseño contiene muchos espacios o vacíos de aire presentes en el contacto entre las partículas de RPET debido a su variedad en la granulometría (Fig. 1).

Las muestras C3a al igual que las muestras C3b y C3c, presentan una excelente respuesta de resistencia a la flexión con valores superiores a los requeridos por la norma, es de resaltar que la deflexión sufrida por la muestra C3a fue menor respecto a las otras dos muestras, por lo que podría relacionarse con la baja presencia de resina la cual se encarga de aglutinar el cemento y el RPET con ella en una mezcla de manera homogénea, pero cuando su presencia es muy baja respecto a la cantidad de estireno sus propiedades mecánicas, físicas y químicas, se ven afectadas directamente, por lo que al tener la presencia de componentes como cemento y RPET, estos dos se encargan de aportar a la poca pérdida de estas propiedades para tratar de reponer o brindar lo mejor de ellos de ser posible, como se evidencia en el ensayo de resistencia a la flexión. Aunque la muestra C3a presenta excelentes valores de resistencia a la flexión, en los valores obtenidos para resistencia a la compresión esta muestra no logró alcanzar el objetivo, por lo que se descarta de ser una de las mezclas adecuadas para la fabricación de baldosas para piso y fachada. Por el contrario, las mezclas C3b y C3c, presentan excelentes valores de resistencia a la flexión (Fig. 3), al igual que en la resistencia a la compresión (Fig. 2), estas muestras se podrían dejar como posibles mezclas adecuadas, sin embargo, por su poca presencia de RPET se podrían usar otras mezclas las cuales cumplan con los requerimientos de la norma y de igual forma contribuyan con un mayor empleo de materiales reciclados.

El resultado de la muestra C4a, aunque presenta una elevada resistencia a la flexión (Fig. 3), se descarta para ser una posible mezcla adecuada, debido a su falta de

resistencia a la compresión (Fig. 2), lo cual deja por analizar los ensayos C4b y C4c, en los cuales se evidencia una disminución entre ellos de 80.4 kN, esto en las muestras C4c debido a la poca maleabilidad presente en esta mezcla, ya que al existir una gran cantidad de resina, el RPET tienen un comportamiento estable frente a las variaciones de la misma, sin embargo el comportamiento del cemento si varía, debido a que las partículas de este son tan pequeñas y se mezclan adecuadamente con la resina, generando una pasta, la cual va adquiriendo una maleabilidad dependiente de la relación resina/estireno, en función de que a mayor resina menor maleabilidad, aun así el RPET mezclado con el cemento en proporciones altas de resina, posee buena maleabilidad, solamente para productos que no superen las dimensiones de 150 x 150 x 8 mm, ya que de ahí en adelante el proceso de mezclado se vuelve complicado y presenta una serie de aglomeraciones, cosa que no ocurrió en las mezclas de menores dimensiones.

Por lo tanto, se puede considerar que una posible mezcla adecuada puede ser el diseño de mezcla C4b, gracias a su excelente respuesta frente a la resistencia a la compresión (Fig. 2), flexión (Fig. 3), sin embargo, la cantidad de RPET aún es baja en comparación con la mezcla que se clasificó como adecuada para la resistencia a compresión la cual fue E5c.

Para las muestras C5a, se evidencia una disminución en la resistencia a la flexión, por lo que se puede decir que el cemento en esta mezcla es un contribuyente con la mejora en la adherencia entre partículas, ya que en los ensayos anteriores la respuesta de las muestras fue mayor a la presentada por esta, lo que indicaría que el cemento, aunque no tenga propiedades de resistencia a la flexión muy altas, en este proceso mejora la adherencia entre las partículas de RPET

De igual modo se puede evidenciar entre los tres diseños de mezcla diferentes a, b y c la importancia de la presencia de la resina en la mezcla en cantidades iguales o mayores que el estireno, debido a que la resina es quien se mezcla con las

partículas de RPET, en el instante en el que inicia su proceso de endurecimiento y curado la liberación de energía en forma de calor es quien garantiza que los residuos de RPET sufran una transformación térmica y entreguen sus propiedades para hacer parte de una nueva mezcla, sin embargo, las muestras C5a se descartan por no cumplir con el requerimiento de resistencia a la compresión (Fig. 2).

Por el contrario, en las muestras C5b se evidencia una diferencia de 729.5 kN con respecto a lo requerido por la norma NTC-1085 para el ensayo de resistencia a la flexión, esta diferencia es gracias al buen comportamiento que presentan los agregados y el aglutinante de la mezcla entre sí, ya que tienen una facilidad para manejarse como una sola mezcla, igualmente la interacción en los procesos inversamente productivos, es decir, mientras la resina en estado líquido reacciona con los aceleradores y catalizadores pasando de estado líquido a sólido por medio de una reacción exotérmica [21]¹⁰.

Por otro lado las partículas de RPET que en tamaños superiores a 5mm x 5mm requieren de altas temperaturas para su transformación de estado sólido a líquido por medio de la extrusión, en este proceso ocurre algo diferente, ya que el tamaño de las muestras es de 160 micras, la temperatura necesaria para transformarlo de estado sólido a líquido no es muy alta, por lo que la resina en su proceso de endurecimiento y curado genera la temperatura necesaria para que actúe como agente extrusor para las partículas de RPET que se encuentran mezcladas junto con el cemento dentro de ella, dejando entonces un material el cual al cambiar su estado está entregando propiedades mecánicas a la mezcla y de este modo se está generando un nuevo material, el cual presenta unas excelentes respuestas frente a lo requerido por la NTC-1085.

²¹ Juárez M., Santiago M; Vera J, "Estudio de la factibilidad para la manufactura de empuñaduras de PET reciclado", Vol. 9, Núm. 2, 2011, pp 1 - 12.

El cemento en esta mezcla actúa como un agente que evita posibles defectos en su forma final, estos generados en la mezcla por la transformación de las partículas de RPET, y los esfuerzos internos que sufre esta misma, ya que se están combinando materiales que tienen propiedades de flexión (RPET) y compresión (cemento). Finalmente la muestra C5c quien presenta una mayor resistencia a la flexión en comparación con las mezclas C3b, C3c, C4b, C4c, y C5b, la cual la deja como la mezcla adecuada, debido a su alto consumo de RPET, y su excelente respuesta frente a lo requerido por la norma (Fig. 3), con una deflexión de tan solo 0.017 mm debido al alto contenido de resina, que aunque representa un elevado costo como materia prima, es evidente que su cantidad puede ser controlada hasta obtener una resistencia tanto a flexión como a compresión según sea requerido.

3.3 ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA (A)

En la Tabla 4 se observan los resultados de la masa inicial, la masa transcurridas 24 horas en el horno, y la masa después de 1 hora más en el horno a una temperatura constante de $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, todas las masas son el promedio de 5 muestras según lo requerido por la norma.

Tabla 3. Resultados promedio de las masas inicial - 24 h en el horno - 1 h en el horno.

Masa (g) inicial Promedio de las muestras					
	A1	A2	A3	A4	A5
Tipo a	47.6	34.8	44	43.3	43.3
Tipo b	70.4	58.9	57.6	50.3	50.3
Tipo c	66	46.5	56.2	53	53

Masa (g) promedio de las muestras 24 horas en horno					
	A1	A2	A3	A4	A5
Tipo a	47.6	34	43.2	42.6	35.7
Tipo b	73.2	58.4	56.8	49.6	45.1
Tipo c	65.4	46.2	55.8	52.7	46.3

Masa (g) promedio de las muestras 1 hora en el horno					
--	--	--	--	--	--

	A1	A2	A3	A4	A5
Tipo a	47.5	33.9	43.2	42.5	35.7
Tipo b	73.2	58.4	56.8	49.6	45.1
Tipo c	65.4	46.2	55.8	52.7	46.3

Finalmente, con los resultados de las masas promedio después de 24 hora en el horno y la masa promedio después de 1 hora más en el horno, se procede a controlar las pérdidas de masa para obtener la masa ideal. Las cuales deben ser inferiores al 0.1%, seguido a esto las muestras deben estar sumergidas en el agua hasta obtener la temperatura de ebullición durante 1 hora, y luego ser removidas y dejadas secando al aire libre.

Transcurridas 12 horas de secado se procede a pasárseles una piel de gamuza húmeda para finalmente determinar su masa, que es denominada como masa final. Una vez completado este chequeo, en la Tabla 5 se observa el resultado obtenido del porcentaje de pérdida de masa para obtener la masa ideal, la masa transcurrida 1 hora de ebullición y el cálculo del porcentaje de absorción de agua acorde con lo especificado en la norma con su respectivo chequeo.

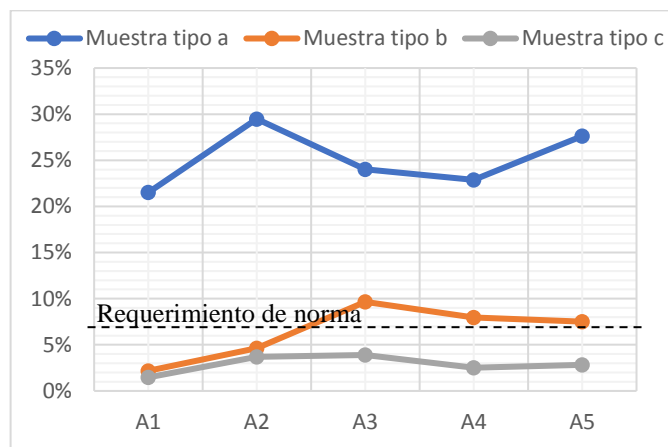
Una vez con estos resultados registrados, como se observa en la Figura 3, las muestras registradas y la comparación de estas con respecto a lo requerido en la norma.

Tabla 4. Resultados porcentaje de diferencia de la masa ideal – masa de ebullición - porcentaje de absorción de agua

Diferencia de masa (%): masa ideal < 0.1%					
	A1	A2	A3	A4	A5
Tipo a	0.084	0.088	0.093	0.086	0.093
Tipo b	0.041	0.051	0.07	0.087	0.096
Tipo c	0.031	0.029	0.042	0.038	0.036
Masa (g) promedio a 1 hora de ebullición					
	A1	A2	A3	A4	A5
Tipo a	57.8	43.9	53.5	52.3	45.5

Tipo b	74.8	61.1	62.3	53.5	48.5
Tipo c	66.4	47.9	57.9	54.0	47.6
Absorción (%) de agua de las muestras					
	A1	A2	A3	A4	A5
Tipo a	21.51	29.48	24.01	22.89	27.62
Tipo b	2.19	4.63	9.65	7.97	7.5
Tipo c	1.47	3.7	3.9	2.51	2.81

Figura 4. Porcentaje de absorción de agua - comparación con el requerimiento de norma.



Puede evidenciarse que solamente las muestras A1a son las que al igual que la resistencia a la compresión no cumplen con el requisito de norma, de igual forma, aunque las otras dos muestras cumplen con el requerimiento, se descartan por ser las muestras que contienen 100% cemento y 0% RPET, lo que no representa ningún tipo de contribución con la reducción de contaminación al medio ambiente.

Es claro que el porcentaje de absorción de las muestras A2a presente una mayor absorción de agua, debido a la gran cantidad de estireno que se evapora de la mezcla, la muestra entra en contacto con el agua sin importar el tiempo de curado de esta, el agua penetra todos los espacios generados por la evaporación del estireno e igualmente la cantidad de espacios generados por las partículas de RPET presentes generan más cantidad de espacios vacíos que no los alcanza a ocupar la poca resina presente en la mezcla y que por el contrario son ocupados por el

estireno que se presenta en exceso, dejando como resultado una mezcla porosa. Por el contrario, las muestras A2b y A2c presentan una baja absorción de agua, debido a que las cantidades de resina aumentaron en comparación con las muestras A2a, lo cual permite que los pocos espacios que se generan con el estireno que se evapora de la mezcla sean ocupados en gran parte por la resina, sin embargo estas dos mezclas finales se descartan porque aunque contienen un 100% de RPET, las cantidades de resina que requieren para llenar estos vacíos son muy altas y esto eleva los costos de fabricación de las muestras.

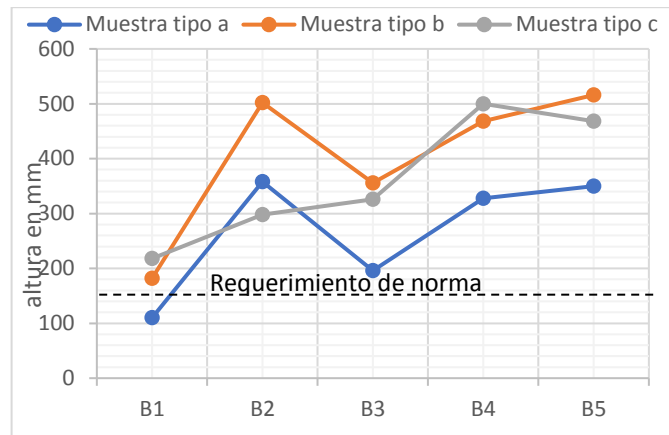
En la mezcla A3a es evidente que el porcentaje de absorción de agua, aunque no cumple con el requerimiento de la norma, presentaron una reducción de este en comparación con el obtenido para la muestra A2a, lo cual deja claro que el cemento llega a ocupar una serie de espacios vacíos presentados por el contacto entre las partículas de RPET, sin embargo, este diseño de mezcla se descarta de ser posible mezcla adecuada junto con los dos ensayos ya antes mencionados. Por otra parte, en la mezcla A3b el porcentaje de absorción de agua es de tan solo 2,65% superior a lo requerido por la norma, por lo que comparando los resultados de absorción con la resistencia a la flexión y compresión que fueron excelentes, esta mezcla se descarta porque no cumple con el requerimiento de la norma la cual hace referencia a que se deben cumplir todos los ensayos, de lo contrario la muestra no cumple. Se puede observar que en las mezclas A4a y A4b, no cumplen con el requerimiento de la norma, sin embargo, la disminución del 1,117% en la primera y del 1,683% en la segunda deja claro que al ir reduciendo la cantidad de cemento presente en la mezcla y a mayor cantidad de partículas de RPET sin llegar a ser un 100% da como resultado una reducción en la absorción de agua, aunque se debe mantener una mínima cantidad de cemento para garantizar que estas partículas tengan una adecuada adherencia entre ellas y se puedan llenar los espacios vacíos presentes, dejando así a la muestra A4c como uno de los posibles diseños de mezcla adecuados para el diseño y fabricación de baldosas para piso y fachadas a partir del reciclaje de botellas tipo PET.

Los resultados obtenidos en las mezclas A5a y A5b no cumplen con el requisito de absorción de agua exigido, por lo que se descartan de ser diseños de mezcla adecuados, dejando solamente al ensayo A5c como el diseño de mezcla más adecuado, ya que aunque su porcentaje de absorción de agua es menor comparado con el obtenido por la muestra A4c en un 0,307% este contiene la mayor cantidad de RPET, el cual es un factor de alta importancia ya que lo que se busca en esta investigación es lograr obtener la mayor cantidad de RPET agregado en la mezcla logrando con esto optimizar la poca resistencia a la flexión que presentan las baldosas de cemento, e igualmente cumplir las condiciones que se presentan en la NTC-1085.

3.4 ENSAYO DE RESISTENCIA AL CHOQUE

Para el ensayo de resistencia al choque se llevó a cabo el procedimiento descrito según la norma NTC – 1085, del cual se pudo obtener un registro promedio para 5 muestras individuales de acuerdo con cada uno de los 5 diferentes diseños de mezcla, teniendo en cuenta las 3 diferentes variaciones de cantidad entre la resina y el estireno. En la Figura 5 se presentan los resultados de las alturas máximas promedio obtenidas para cada una de las diferentes mezclas comparados con el requerimiento de la norma para este ensayo y garantizando unos resultados excelentes en un 90% del total de las muestras falladas.

Figura 5. Alturas máximas promedio - requerimiento de la norma.



En este ensayo es evidente que, de los tres diseños de mezcla, existe una respuesta promedio la cual frente a lo requerido por la norma no cumple, sin embargo, aunque las otras dos muestras si cumplen con este requerimiento, se descarta ya que no hacen parte de los posibles diseños de mezcla adecuados. De igual forma también se observó una respuesta en la fractura de estas muestras, la cual fue de tipo explosiva o falla inmediata frente al impacto, debido a que estas mezclas contienen 100% cemento el cual no tiene buena respuesta frente a esfuerzos de flexión ocasionados por el impacto de la masa de prueba, igualmente el cemento no tiene tampoco muy buena respuesta frente a una disipación de energía lo que también influye en este tipo de respuesta explosiva en los tres diseños de mezcla.

En los resultados promedio obtenidos para este ensayo, se observa un aumento con respecto al ensayo B1 en la resistencia al choque, igualmente se puede resaltar que la respuesta al momento de la falla de la muestra fue muy diferente en comparación con la obtenida para la fractura de tipo explosiva presente en la muestra B1, en este caso, las muestras tuvieron un tipo de fractura leve, ocasionada por la deformación que obtuvo el material y la capacidad de absorber el impacto y disiparlo por medio de la deformación de la muestra B2a, para el caso de la muestra B2b, la fractura también fue un poco más leve ya que esta no alcanzó a presentarse

en todo el material, sino por el contrario solamente se hizo presente en la zona deformada por causa del impacto ocasionado por la masa de prueba.

En la mezcla B2b la cual contiene iguales cantidades de proporción de resina y estireno y dejan en evidencia un aumento en la resistencia al choque, el cual es debido a la buena interacción entre partículas de PET y las propiedades que brinda la resina al interactuar con estas partículas.

En la muestra B2c se presenta también una leve fractura, pero ya con una deformación más pequeña en comparación con las deformaciones presentadas en las muestras B2a y B2b.

Los resultados de este ensayo dejan en evidencia que la presencia del cemento y el PET como una mezcla generan un aumento de la altura de resistencia al choque en comparación con los diseños B1 y B2, los cuales presentan resultados con un valor inferior al obtenido en este diseño, sin embargo, se resalta la diferencia presente entre los ensayos B2b y B3b en los cuales la falla se ocurre en una diferencia de 126 mm de altura, donde la mezcla B2b la cual contiene 100% PET deja en claro la capacidad de disipación y resistencia al impacto del PET, de igual forma también se resalta que aunque los resultados obtenidos en los tres diseños de mezcla superan el requerimiento de la norma, no se determinan o se tienen en cuenta como alguno de los posibles diseños de mezcla adecuados ya que en el caso del ensayo B3a no cumple para el ensayo de resistencia a la compresión, y tampoco cumple en la resistencia a la absorción de agua y para el ensayo B3b este no cumple con lo requerido para el ensayo de absorción de agua, y para la muestra B3c, se descarta como adecuada ya que su composición no contiene una gran cantidad de PET en comparación con los otros diseños.

Por otra parte, las fracturas presentadas en estos diseños de mezcla en los tres casos fueron muy similares y presentaron una grieta la cual era causada por la

presencia de cemento en gran cantidad en la mezcla, la grieta alcanzó a cruzar la muestra de una arista a la otra sin generar el desprendimiento entre las dos piezas generadas por la fractura.

Con los resultados obtenidos en este ensayo, se puede comprobar que a medida que la cantidad de PET aumenta, la poca participación del cemento en la mezcla es opacada por este aumento de partículas de PET, el cual empieza a dejar en claro su aporte a la mezcla en el aumento de su altura de resistencia al choque, sin embargo, estos resultados se deben descartar por no cumplir con el requerimiento en la norma específicamente en el ensayo de absorción de agua para el caso de la mezcla B4b, para la mezcla B4a no cumple con lo requerido para el ensayo a compresión, dejando así únicamente como posible diseño de mezcla adecuado el B4c, sin embargo aunque tiene un porcentaje significativo de PET y presenta el mayor valor de altura de resistencia al choque entre los diseños de tipo c donde es mayor la presencia de resina y estireno, el contenido de cemento se puede seguir reduciendo y se puede obtener un diseño de mezcla más adecuada en cantidades de PET utilizado sacrificando un poco el valor de la altura de resistencia al choque.

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos B5, se puede evidenciar que en el ensayo B5a se presenta un aumento de 12 mm en comparación con la muestra B2a la cual era quien tenía el registro de mayor resistencia en altura. Esto deja muy claro el arduo trabajo que presenta el PET en la resistencia al choque en mezclas las cuales la cantidad de resina es baja e igualmente el cemento es una baja cantidad, en donde esta mezcla es una mezcla que presenta un buen resultado para este ensayo, sin embargo, en el ensayo de resistencia a compresión y absorción de agua no cumple con los requerimientos de la norma. En cambio, en el diseño de mezcla B5b, se observa un aumento de 34 mm en comparación con la mezcla B2b la cual presentaba el mayor valor de altura de resistencia al choque, aunque esta muestra tenga excelentes resultados frente a lo requerido por la norma, con respecto a la cual tiene una diferencia de 366 mm superior al requerimiento que es de 170 mm,

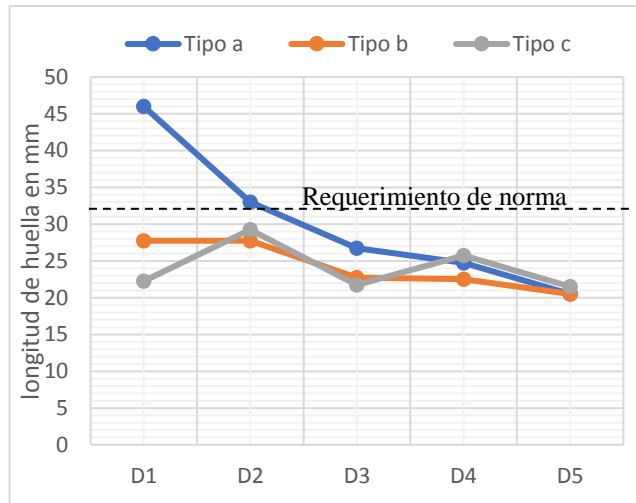
se desprecia el uso de este diseño de mezcla como uno de los diseños más adecuados ya que este diseño no cumple con lo requerido por la norma para el ensayo de absorción de agua.

Ya como resultado final se tiene el ensayo B5c el cual presenta una segunda mejor respuesta en altura frente a la muestra B4c la cual es la de mayor altura presentada durante el ensayo, con este diseño de mezcla B5c siendo el más adecuado como se nombró anteriormente, se puede decir que hay una respuesta menor de la resistencia en altura comparada con la mezcla B5b, por lo que en esta mezcla B5c queda claro que aunque las cantidades de materiales usados son una gran parte PET, este mismo genera una serie de vacíos por la separación entre partículas que en algunos casos son ocupados con la presencia del estireno la resina y el cemento, los cuales durante su proceso de curado la resina y el estireno ascienden a la superficie por su baja densidad en comparación con los demás agregados, y esto genera que se pueda presentar vacíos presentando una serie de poros los cuales se deben controlar al aumentar la cantidad de cemento para generar una mayor adherencia y sellado entre partículas. En este caso, lo mejor es trabajar con el diseño de mezcla B5c el cual se ratifica como el más adecuado de entre los demás ensayos por su alto contenido en material reciclado y su bajo consumo de cemento, de igual forma se puede decir que esta mezcla tiene una diferencia de 318 mm en comparación con lo requerido por la norma para el ensayo de resistencia al choque.

3.5 ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESGASTE

A continuación, en la Figura 6 se presentan todos los resultados promedio del ensayo de resistencia al desgaste, y su comparación con respecto a lo requerido por la norma.

Figura 6. Resultados promedio longitud de las huellas y requerimiento de norma.



Como se puede analizar los resultados del ensayo a desgaste de los diseños de mezcla realizados para este estudio, las únicas muestras que presentaron valores superiores a los 32 milímetros de desgaste fueron D1a y D2a las cuales tienen una mayor cantidad de estireno que resina, sin embargo todas estas muestras como el ensayo lo indicaba se debían someter a 48 horas sumergidas en agua, lo cual puede generar un curado del cemento durante estas horas en agua, una vez se ha endurecido la resina presente en la mezcla y se ha solidificado en su totalidad, junto con la evaporación de la gran cantidad de estireno presente, dejando al cemento prácticamente libre para que actué bajo los efectos de la absorción y reacción con el agua y de esta manera generando una resistencia que aunque fueron las únicas que presentaron valores superiores a los requeridos por la norma, la cual exige un máximo de 32 mm como desgaste para estas mezclas, lo que deja claro que la gran mayoría de los diseños presentes cumplen con este requisito de desgaste y ratificando de manera total que el diseño de mezcla más adecuado de entre todos los utilizados para esta investigación definitivamente fue la mezcla 5c la cual tiene una composición de 20% estireno y 80% resina, y con una composición de 10% cemento y 90% PET, y con una huella de desgaste de tan solo 21.5 mm. Aun así, no se descartan los demás diseños de mezcla como posibles diseños para otro tipo

de materiales no estructurales los cuales se pueden sustituir por alguna de estas mezclas y generar una mayor conciencia de reciclar y reutilizar estos desechos de tipo poliméricos los cuales se pueden convertir en nuevos materiales que inclusive podrían tratarse como prefabricados entre otros.

4. CONCLUSIONES

1. Los diseños de mezcla que poseen una proporción de Resina COP4 menor que la cantidad de estireno presentan una resistencia a la compresión menor a la requerida por la norma NTC-1085, dejando en evidencia que la relación de estos dos componentes es un factor que afecta directamente la capacidad de la mezcla para resistir esfuerzos de compresión ya que la presencia de estireno en grandes cantidades reduce la adherencia que se genera entre partículas de RPET y cemento, las cuales al ser aglutinadas con resina presentan un mejor comportamiento en comparación con las que se aglutinan con mayor cantidad de estireno.

2. Una relación de resina poliéster COP4 – estireno con iguales proporciones, mejora en gran medida la capacidad de resistir esfuerzos de compresión de la mezcla, debido a que la resina puede interactuar de manera más eficiente y mejorar las propiedades mecánicas a la mezcla, que al juntarse con el cemento generan una adherencia entre partículas de RPET en sus diferentes tamaños e igualmente van ocupando posibles vacíos que se generan entre partículas de RPET.

3. A medida que la cantidad de RPET aumenta para los diseños de mezcla la capacidad de esta para resistir esfuerzos de compresión aumenta gradualmente, siempre y cuando este combinada con el cemento, ya que la muestra de 100% RPET, aunque se encuentra por encima de los requerimientos de la norma tiende a la baja comparada con las que contienen cemento y RPET.

4. Es evidente que los diseños de mezcla en cualquier combinación superan altamente los valores exigidos por la norma NTC-1085 en resistencia a flexión en casi 700 veces, presentando deflexiones pequeñas, e inferiores a 10 mm, sin embargo, en el ensayo de absorción de agua muchos de los ensayos con los

resultados considerados como los posibles diseños de mezcla adecuados, se vieron afectados por este ensayo.

5. El cemento actúa como aglutinante para las partículas de RPET, llenando los espacios vacíos y mejorando la resistencia a la flexión en los diseños de mezcla, ya que sin este la adhesión de las partículas de RPET aunque presenta excelentes valores de resistencias a compresión y flexión, el ensayo de absorción de agua dejó en evidencia una gran cantidad de poros que no se perciben a simple vista pero que se encuentra dentro de la mezcla, los cuales fueron la causa de solamente aprobarlo el ensayo A2c entre otros ensayos, el cual hace referencia a 100% RPET y mayor cantidad de resina que estireno, los otros dos diseños de mezcla de 100% RPET fueron rechazados por no cumplir con este ensayo.

6. La maleabilidad de las mezclas es dependiente de la relación resina/estireno que tenga la muestra, es decir, a mayor cantidad de resina el proceso de mezclado se dificulta, generando inconvenientes en el resultado final de esta y afectando la entrega de propiedades de la resina al diseño respectivo, de igual forma las cantidades de agregados como el cemento generan una mezcla de tipo plástica entre la resina y el, lo que dificulta de manera drástica también la maleabilidad de la mezcla.

7. Aunque muchos de los diseños de mezcla tienen unos resultados elevados respecto a los requerimientos de la norma respecto a la resistencia a la flexión y a la compresión, en la absorción de agua se presentó una gran cantidad de muestras que no aprobaron los ensayos entre las cuales se encuentran, A1a, A2a, A3a, A3b, A4a, A4b, A5a, y A5b, las cuales presentaron valores superiores al máximo permitido por la NTC-1085, por lo que en cuestiones de absorción de agua, la muestra que ya venía siendo seleccionada como uno de los mejores diseños de mezcla, en este ensayo confirma que por sus niveles de absorción de agua bajos,

cumple de manera adecuada con todos los ensayos requeridos en la NTC-1085 para flexión, compresión y absorción de agua.

8. Es importante resaltar que los diseños de mezcla que no fueron considerados como adecuados, son unos resultados excelentes con respecto a lo requerido por norma, dejando como posible un estudio más avanzado en el diseño de estas mezclas, ya que en comparación con concreto de estas capacidades serían los de tipo polimérico, y el costo de estos es elevado.

9. Los procedimientos de fabricación de las muestras pueden variar dependiendo las dimensiones o forma del molde, ya que con este método se permite fundir elementos para fachadas de forma semicircular o inclusive se podría llegar a producir baldosas con diseños diferentes a los cuadrados o rectángulos conocidos en el mercado actual.

10. Es importante resaltar que con estos resultados es posible fabricar unas baldosas para edificaciones como hospitales y alcaldías o entidades públicas en las cuales los accesos a las personas con discapacidad visual puedan acceder a aquellos lugares donde se deban dirigir a realizar sus trámites de una manera más cómoda y por medio de una guía la cual se está implementando actualmente en las zonas de espacios públicos y andenes.

BIBLIOGRAFIA

ARROYO M. Carla V.; Loyo D. Carlos, “Diseño de una planta para la producción de polimetilmetacrilato y baldosas de resina poliéster insaturada reforzados con la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos de computadoras desechadas”, trabajo de grado, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, 2015, pp 21-26.

BESEDNJAK A. (2005), *Materiales compuestos proceso de fabricación de embarcaciones*, Barcelona-España, Ediciones UPC, pp 27-28.

CARRASCO T. Egida; Influencia de la concentración del peróxido de benzoilo y de la temperatura del ambiente en el tiempo inicial de gelificación de una resina poliéster insaturada; Tesis de pregrado; Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo; Lambayeque – Perú; 2016.

Catalizadores y Acelerantes, PQ representaciones, Nuble 324 Santiago, www.pq.cl

Cemento por kilogramo de argos. Argos. disponible: <http://grandesrealidades.argos.co/argos-introduce-saco-de-cemento-gris-de-1-kilo/>

DISECLAR, diseño y fabricación ecológica, Empresa Colombiana, Cali. < <https://diseclar.wordpress.com/>>

GAMMA CAMPILLO, Lilia, Reciclado de Polietilen Tereftalato (PET) Diversas Opciones, EN Revista de Divulgación, División Académica de Ciencias Biológicas, Volumen XVII, Número 32, enero-junio 2011, pp 5-6.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Baldosas de Cemento, Editada 2003-02-18. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC, 2003. 13p. NTC 1085.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Cementos. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico, Editada 1999-07-28. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC. 8p. NTC 221.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Método para determinar la densidad y absorción del agregado fino, Editada 2001-07-23. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC.13 p. NTC 237.

JARAMILLO L, Patiño I, “Selección de resinas de poliéster insaturado para procesos de transferencia de resina en molde cerrado”, Artículo de investigación, Núm. 28, julio, 2012, pp 109 - 127.

JUÁREZ M., Santiago M; Vera J, “Estudio de la factibilidad para la manufactura de empuñaduras de PET reciclado”, Vol. 9, Núm. 2, 2011, pp 1 - 12.

LOPEZ, Blanca, PEREZ, Beatriz, MORA, Josefina, “Influencia de determinados polimorfismos de enzimas metabólicas en la genotoxicidad del estireno”, Genotoxicidad del estireno, Vol. 70, Núm. 1, 2004, pp 95 - 123.

METILETILCETONA. Gobierno de España. Ministerio de empleo y seguridad social. instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. disponible: <http://desengrase.insht.es/sustancias/metiletilcetona-mek.html>. (25-07-2017).

PALATAL COP4. Empresa motorex. Disponible: <http://www.motorex.com.pe/producto/resina-de-poliester-palatal-co-p4>.

QUINTERO L. Diseño de una planta de reciclado de Tereftalato de polietileno (PET). Universidad politécnica de Valencia. Valencia, España.

RODRÍGUEZ R. Sara C., Residuos Sólidos en Colombia: Su manejo es un compromiso de todos, L'esprit Ingénieux 2, Vol. 2, Num. 1, 201. pp 92-93.

SÁNCHEZ M., Rosales A., Maldonado H. (enero-marzo 2011). Estudio de catalizadores en la degradación de PET reciclado. Ciencia UANL. Vol. XIV (1), pp 39.

SUAREZ, Daniel, Sólo el 26% de las botellas plásticas se recicla, La República. [Base de datos en línea]. jueves, marzo 10 de 2016, http://www.larepublica.co/solo-26-de-las-botellas-pl%C3%A1sticas-se-recicla_357536

VALENCIA, Mayra E.; Collazos, Paola A.; Mina, José H.; Toro, Edwar F.; Caracterización físico mecánica de concreto polimérico basado en resina poliéster, Revista científica Guillermo de Ockham, Vol 8, núm. 1, enero-junio;2010, pp 84-92.

VENCES U. Isabel; Evaluación del proceso de conversión de PET estándar i biodegradable en resina líquida, mediante glicosis; tesis de grado; Universidad Veracruzana; Facultad de ciencias químicas; Xalapa Enríquez; México; 2015.