



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

**REDUCCIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS A TRAVÉS DE UN ESTUDIO
COMPARATIVO DE MATERIALES RECICLADOS PARA LA ELABORACIÓN
DE HORMIGONES DE BAJA DENSIDAD**

Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos
establecidos para optar por el título de
Ingeniero Ambiental en Prevención y Remediación

Profesor Guía

Ing. Nelson Iván Cisneros Pérez

Autor

Andrés Felipe Herrera Cevallos

Año

2013

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

Nelson Iván, Cisneros Pérez

Ingeniero

CI: 1708036635

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Andrés Felipe, Herrera Cevallos

CI: 1720166147

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermana por tender siempre su mano sin condiciones; a mi tutor, Ing. Iván Cisneros por su motivación y guía en este proceso; al Ing. Carlos Banchón por su constante ayuda; al coordinador de matemática Juan Carlos García por su ayuda grata; al Gestor Ambiental de Mediana Escala, el Sr. Mario Moreno; al Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP) de la EPN, y a los Laboratorios de Mecánica de Suelos y Ensayo de Materiales de la EPN.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres y sobre todo amigos, Manuel y Margarita, sin su apoyo y amor esto no hubiera sido posible; a mi mejor amiga y hermana incondicional, Lucía, alegría de mi vida y guía; a Patricia y Jordan, parte de mi familia; a Sandra, Valeria, Daniela, Cucho, José, Alejandro, Odyll por haber aparecido en mí camino; a mis hijas: Lulú, Loba, Diurca, Ona, Botón, Pelusa, Sami, Bol y Sori; y a mi gran pasión, la música.

RESUMEN

Uno de los problemas más grandes que presenta el Ecuador es la falta gestión de residuos sólidos. El Distrito Metropolitano de Quito es una de las localidades que a lo largo de su historia ha ido construyendo un sistema de gestión de residuos sólidos (creación de rellenos sanitarios, normativa local y programas de concienciación). Lamentablemente todas las acciones del distrito han sido medidas paliativas sobre el problema, con escaso control.

Quito, al ser capital del Ecuador, se ha convertido en el sinónimo de desarrollo local concentrando gran cantidad de población; por este motivo la ciudad tiene generación de desechos de características sintéticas (plásticos), poco reciclados y terminan en el mayor de los casos en rellenos sanitarios o botaderos como pasivos ambientales.

Por otra parte, el calentamiento global es un problema que está en boga. Este fenómeno es causado mayoritariamente por el dióxido de carbono, gas emanado por la actividad industrial. Puntualmente, la industria cementera (utilizada para la creación de hormigón) aporta anualmente el 2% del CO₂ mundial.

El siguiente trabajo de titulación presenta una opción para mitigar el problema de los desecho sólidos en el DMQ principalmente, y como segundo efecto, disminuir el CO₂ de la industria cementera; mediante la experimentación y análisis de la densidad y resistencia de materiales ligeros útiles en la industria de la construcción creados a partir de la unión de desecho plástico (PS, PP y LDPE) y hormigón convencional.

En conclusión: la experimentación y el análisis de sus resultados indicaron dos materiales óptimos creados con PP y LDPE de reciclaje, y hormigón; utilizables como hormigón ligero según su densidad y resistencia, ocupando menor cantidad de cemento que los habituales, disminuyendo su huella ecológica (CO₂ emanado).

ABSTRACT

One of the biggest environment problems in Ecuador has been the solid waste management. Quito, the capitol city, has created in his history a few tools to solve the problem waste, such as: landfills creation, local regulations and awareness programs. Unfortunately those actions have not decreased the problem.

Quito throughout Ecuador's history has been synonymous of local development; this is the reason why Quito's population has increased, and thereby the amount of synthetics solid waste, becoming them into an "environmental liability".

Moreover, the global warming is the most important current environment problem around the world. The principal cause are "greenhouse effect gases", the most important of them is carbon dioxide generated by industrial activity. The cement industry represents 2% of world CO₂ pollution.

The following graduation work gives an option to mitigate the synthetics solid waste problem in Quito as principal effect, and like a second effect, reduce the CO₂ from the cement industry (principal component of concrete); through of experimentation and analysis of the density and strength of lightweight materials, useful in the construction industry, created from the union of plastic waste (PS, PP and LDPE) and conventional concrete.

In conclusion: the experimentation and analysis of the results indicated two materials optimal created with PP and LDPE recycled along with conventional concrete; useful like lightweight concrete, occupying less than the usual cement, reducing its footprint organic (CO₂ emanated).

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
II. DESARROLLO DEL TEMA	3
CAPÍTULO I	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Planteamiento del problema.....	5
1.3 Hipótesis	6
1.4 Alcance	6
1.5 Justificación.....	6
1.6 Objetivos	7
1.6.1 Objetivo general.....	7
1.6.2 Objetivos específicos	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1 Situación de los desechos en el DMQ.....	9
2.1.1 Residuos reciclables	11
2.2 Marco legal de los desechos sólidos en el DMQ	14
2.2.1 Gestores ambientales	16
2.2.2 Impuestos a botellas PET	17
2.3 El manejo de residuos reciclables en el DMQ	18
2.4 Residuos plásticos reciclados en el DMQ.....	22
2.5 Codificación de los plásticos o polímeros utilizados por industria y encontrados en los desechos	25
2.5.1 Degradación de los plásticos ocupados en la industria	27
2.6 Realidad de distintos polímeros en el Distrito Metropolitano de Quito	28
2.6.1 Disposición para el reciclaje de desechos plásticos en el DMQ	33
2.7 Hormigón.....	33
2.7.1 Tipología el Hormigón	34
2.7.2 Hormigones ligeros	36
2.7.3 Ensayos físicos para conocer la validez del hormigón.....	39
2.8 Problemática ambiental de la industria cementera	42
2.8.1 El CO ₂ y el hormigón.....	43
2.8.2 La industria cementera en el Ecuador	46

2.9 Trabajos similares al presentado	48
2.10 Procesos o tecnologías útiles al trabajo	55
CAPÍTULO III: DISEÑO EXPERIMENTAL.....	57
3.1 Metodología	57
3.1.1 Criterio de selección de desechos plásticos reciclables a utilizar en la experimentación	58
3.1.2 Identificación de la forma a adquirir los desechos para poder utilizarlos en la experimentación (unión de plástico con hormigón)	59
3.1.3 Elección de hormigón convencional en base a su resistencia	61
3.1.4 Diseño experimental de las muestras de materiales experimentales ...	64
3.1.5 Determinación del tamaño de las muestras cilíndricas	69
3.1.6 Preparación de muestras de hormigón convencional y materiales experimentales	70
3.1.7 Identificación del material óptimo post experimentación	76
3.2 Procesos obligatorios en la preparación de muestras de materiales investigados	77
3.2.1 Preparación de moldes cilíndricos	78
3.2.2 Proceso de encofrado	79
3.2.3 Proceso de fraguado.....	81
CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....	82
4.1 Desechos plásticos seleccionados para la experimentación ...	82
4.2 Forma en las que se ocuparon los desechos en la experimentación	83
4.3 Muestras cilíndricas de materiales de pruebas preliminares de hormigón con desechos plásticos y materiales experimentales, para analizar en laboratorio	84
4.4 Cálculo de la muestra.....	86
4.1.1 Dosificación para muestras de hormigón convencional	86
4.1.2 Dosificaciones para pruebas preliminares de hormigón con desecho plástico.....	87
4.1.3 Dosificaciones para muestras de materiales experimentales	88
4.2 Resultados de los ensayos de laboratorio	91
4.2.1 Resultados de pruebas preliminares.....	92
4.2.2 Resultados de muestras de materiales experimentales.....	94
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	97
5.1 Análisis tecnológico.....	97

5.1.1 Densidad.....	97
5.1.2 Resistencia a la compresión	98
5.2 Análisis estadístico	99
5.2.1 Hormigón convencional.....	99
5.2.2 Pruebas preliminares de hormigón con desecho plástico	100
5.2.3 Muestras de materiales experimentales (mezclas)	106
5.3 Análisis de beneficios ambientales (identificación de materiales óptimos)	136
5.3.1 Dosis óptimas para materiales con 30% de polímero	137
5.3.2 Dosis óptimas para materiales con 40% de polímero	139
5.3.3 Valoración ambiental y estructural de los materiales estudiados.....	140
5.4 Análisis costo beneficio	146
5.4.1 Costo de agregados, cemento, polímeros reciclables y agua.....	146
5.4.2 Costos de materiales experimentales óptimos.....	147
5.4.3 Costo de hormigones ligeros análogos a los materiales óptimos	148
5.4.5 Resumen del análisis costo beneficio	151
III. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	152
Conclusiones.....	152
Recomendaciones	154
REFERENCIAS.....	155
ANEXOS	160

I. INTRODUCCIÓN

La creciente demográfica en centros urbanos, a razón de procesos de migración interna como externa por razones económicas, lleva a cuestionarnos sobre los efectos que pueden generarse por el mencionado fenómeno; la variación demográfica en una zona da lugar a efectos de carácter social, económico, cultural y ambiental, ya que al ser las necesidades de una población proporcionales a su magnitud (número de individuos), la dinámica de ese grupo, en términos económicos y sociales varían, y por ende existen alteraciones en aspectos ambientales y culturales (al aumentar la demanda en el mercado se generan más residuos, efluentes y poluciones; y al existir una cultura foránea, el comportamiento social varía, pudiendo existir una sinergia entre ambos componentes).

Al hablar de la ciudad de Quito, se habla del eje de desarrollo del país, por mucho tiempo la capital ecuatoriana albergó en gran medida las instituciones encargadas del manejo del país (presidencia y ministerios, congreso actualmente conocido como asamblea, y la suprema corte de justicia); por este motivo la ciudad de Quito fue reconocida, en la historia republicana y moderna, como el principal generador de economía para el estado y por esta razón una zona con una densidad de empleos relevante, motivo por el cual ha sido destino de muchos migrantes internos (ecuatorianos de otros cantones o provincias).

En Quito el fenómeno de la inmigración ayudó a fortalecer problemas ya existentes en el sector (crecimiento descontrolado de la urbe, déficit de equipamientos básicos, déficit de vivienda, déficit de empleo) y dio lugar a nuevos problemas, en especial de carácter ambiental, como la degradación del medio ambiente por explotación de recursos (primordiales para suplir necesidades de la población) y disposición final de desechos, efluentes y poluciones.

Conforme la globalización avanzó, culturas externas a la patria comenzaron a afectar la idiosincrasia de la población, un claro ejemplo fueron las nuevas tendencias de consumo, donde la calidad de vida de la población tiene estrecha relación y es proporcional a la cantidad de bienes que posee; estos nuevos paradigmas, en acción con el desarrollo de la industria, contribuyeron a generar mayor cantidad de desechos en la población, de características sintéticas o mayormente conocidas como inorgánicas, siendo desechos de un tiempo de vida prolongado. El problema de la ciudad realmente se dio cuando comenzó a generar una considerable cantidad de desechos inorgánicos que aumenta en el tiempo y hasta el momento no existe un sistema cabal de dichos desechos y se los trata habitualmente como pasivos ambientales.

Es de suma importancia para la ciudad encontrar un sistema de gestión de residuos sólidos, que ofrezca un manejo responsable; mas allá de las acciones gubernamentales el problema de los desechos en la capital ecuatoriana, podría representar una opción para el crecimiento industrial que buscaría mitigar el problema, se deben buscar formas de ocupar el desecho de la ciudad de tal manera que su vida útil sea aumentada considerablemente.

En la tesis aquí postulada se explica una manera de ocupar ciertos desechos sintéticos, que representen cantidades considerables del total de desechos sólidos; en la industria de la construcción en conjunto con el hormigón, con el fin de mitigar el problema de desechos en Quito, buscando un uso práctico en ellos. En el trabajo de titulación a continuación se exhiben dosificaciones entre desechos de características sintéticas conjunto con hormigón (piedra, arena, cemento y agua), aplicando sobre dichos materiales fuerzas evaluadas en laboratorio para identificar su idoneidad al uso, analizando sobre ellos las ventajas ambientales existentes y su costo-beneficio.

II. DESARROLLO DEL TEMA

CAPÍTULO I

1.1 Antecedentes

La gestión de residuos sólidos en la ciudad de Quito se remonta a la época colonial, cuando pueblos indígenas, en especial los ubicados en Zámbriza (parroquia del noreste de la ciudad de Quito), conocidos como capariches, se encargaban del aseo de la ciudad mediante las conocidas “pichanas” que no eran más que escobas hechas de ramas de la planta comúnmente conocida como “Retama”; los desechos recolectados eran dispuestos finalmente en quebradas y ríos habitualmente.

Tiempo después, por efectos de la globalización, Quito es reconocido por la UNESCO como “Patrimonio Cultural de la Humanidad” ya que es una ciudad dotada de riqueza arquitectónica y cultural que data de la época colonial (siglo XVIII), dicha mención fue asignada en la Municipalidad de Álvaro Pérez hacia el año de 1978 (Atlas Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito, 2009, p. 10); aquella calificación a la ciudad de carácter honorífica, constituyó el factor primordial que potenció la gestión de la ciudad en ámbitos sociales y económicos mayoritariamente y ámbitos ambientales en cierta medida con la creación del “Relleno de Basura de Zámbriza” en el año de 1983 (Muñoz Rodríguez M, 2006, p. 2).

Íntegramente la gestión ambiental en la ciudad de Quito se inicia en la década de los noventa con la creación del Departamento de Control de la Calidad Ambiental inherente a la Dirección de Higiene, sin embargo por la presión de ciertos grupos la municipalidad se ve en la obligación a crear un organismo que complementa la gestión ambiental, es cuando, en el año 1994 se crea la Dirección de Medio Ambiente (Atlas Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito, 2009, pp. 11) que hacia finales de los 90 cambia a “Secretaría del Ambiente”; desde ese momento se formula un marco legal ambiental, en base a ordenanzas municipales, para el DMQ que considera varios aspectos ambientales (residuos sólidos, efluentes, poluciones, espacio público, áreas protegidas).

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en Quito ha constituido una de las problemáticas mayores hasta la actualidad, el manejo de este tipo de desechos está estipulado en la Ordenanza 332 “La ordenanza metropolitana de gestión integral de residuos sólidos del Distrito Metropolitano de Quito” (Ordenanza 332 del Distrito Metropolitano de Quito, 2010, p. 3).

Hacia el año 2007 se formalizaron los grupos que manejan desechos bajo el nombre de gestores ambientales, existiendo tres tipos de gestores: artesanos (separan RSU en cantidades menores y comercializan con ellos), medianos (separan RSU en mayor cantidad, disponen los mismos en maneras aprovechables y comercializan con ellos) y tecnificados (manejan RSU disponiéndolos de maneras aprovechables y comercializan con ellos; manejan residuos sólidos peligrosos buscando una disposición final al ambiente de ellos en base al marco legal).

A pesar de existir voluntades de manejo de RSU y conociendo que el total de residuos reciclables (papel, cartón, vidrio, plásticos y metal) en la ciudad corresponde aproximadamente al 24% del total de residuos generados (Castillo Pazmiño M., 2012, p. 23); la Secretaría del Ambiente indica que de ese total el 18,5% de desechos son aprovechados (Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, 2011) y puntualmente, los desechos plásticos que ocupan un aproximado del 13,8% del total de desechos reciclables (Atlas Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito, 2009, p. 40), solamente se reciclan en un aproximado de 2% del total del desecho mencionado, es decir, que el 98% del desecho plástico se confina en rellenos sanitarios y botaderos, siendo una cantidad aproximada de 84.286,1 toneladas según la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito para el año 2012. Es conocido que uno de los mayores problemas de los materiales sintéticos (plásticos) es su tiempo de vida prolongado, pudiendo llegar ser inocuo durante centenares de años.

Por otra parte el hormigón (material primordialmente fabricado entre la mezcla de agua, arena, piedra y cemento) ha llegado a ser un material imprescindible para la construcción; nuestra alta dependencia paulatinamente ha tenido como efecto el aumento del cemento, aglutinante dentro del hormigón; “World Business Council for Sustainable Development” indica que entre 1990 y 2010

se ha incrementado el uso del cemento en un 62% aproximadamente (324.000.000 toneladas), denotando la importancia que ha adquirido este material a la sociedad contemporánea. (World Business Council for Sustainable Development, 2010, sección 311c).

El aumento del uso de cemento tiene implicaciones ambientales, especialmente por la polución de CO₂ que conlleva la fabricación del material; se estima que entre 2005 y 2010 hubo una polución aproximada de 546,33 millones de CO₂ anualmente (World Business Council for Sustainable Development, 2010, sección 312b). Si se compara las emisiones de CO₂ de la industria cementera con el total anual, se puede indicar que para el 2009 la industria cementera fue la responsable del 2% del CO₂ generado por la actividad humana (El Banco mundial, 2010).

1.2 Planteamiento del problema

La generación de desechos inorgánicos (plásticos mayoritariamente) en el DMQ representa aproximadamente el un décimo del total de desechos según el último Atlas Ambiental del DMQ, esto se debe a que existen materiales dentro de este desecho que su tiempo de vida útil es muy corto y son de generación masiva en la ciudad, en base a datos de la Secretaría del Ambiente y estudios realizados por EMASEO se indica que la cobertura de desechos plásticos reciclables por gestores ambientales es de un máximo de 2% del total de desechos plásticos que la ciudad genera, es decir, existe una cantidad considerable de residuos plásticos que pasan a ocupar un puesto de pasivo ambiental dentro de los rellenos sanitarios (principal problemática de los residuos sintéticos); lamentablemente no existen actividades puntuales a corto plazo para solventar dicho problema; se deben investigar alternativas para utilizar los materiales de corto tiempo de vida útil, para mitigar problemas ambientales y recibir beneficios del uso de esos desechos.

Un problema que ha adquirido un carácter holístico es el cambio climático por los conocidos gases de efecto invernadero, como el CO₂; la disminución del uso de materiales que aportan CO₂ con otros que pueden representar menor

impacto al aumentar su vida útil (como es el caso del poliestireno expandido, PET, otros) es un tópico importante a investigar.

1.3 Hipótesis

La dosificación de materiales de corto tiempo de vida útil en conjunto con hormigón, forman un material que entrega condiciones análogas a hormigones livianos, disminuye la cantidad de desechos plásticos en rellenos sanitarios y disminuye el CO₂ emitido por parte del cemento reemplazado.

1.4 Alcance

Como alcance del proyecto de tesis se ha establecido la comparación de hormigón de bajas densidades, con hormigones que contengan diferentes dosificaciones de elementos reciclados, como son: polietileno tereftalato (PET), polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE), policloruro de vinilo (PVC), polipropileno (PP) poliestireno (PS) y otros desechos; mediante pruebas físicas que develen la idoneidad del uso del nuevo material obteniendo así usos análogos a los hormigones de baja densidad.

1.5 Justificación

Visto que existen varios materiales que tanto en su producción y tiempo de vida representan un problema ambiental directa en indirectamente hablando (generan CO₂, representan un pasivo ambiental) la investigación en cuestión busca dar alternativas para la utilización de ellos en el sector de la construcción civil, que alarguen su vida útil y dar una opción que busque disminuir la cantidad de dichos desechos en rellenos sanitarios. El análisis se enfocará en la dosificación de los materiales reciclables en conjunto con hormigón para generar un nuevo material de características similares a hormigones ligeros, y por ende, poder ser utilizado en aplicaciones similares.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Diseñar y fabricar un material de características similares al hormigón de baja densidad que pueda ser utilizado en la industria de la construcción a partir de elementos reciclados y hormigón convencional.

1.6.2 Objetivos específicos

- Analizar las composiciones de materiales reciclables que genera el Distrito Metropolitano de Quito, determinando su disponibilidad para la experimentación y así identificar dosificaciones de mezcla con hormigón para formar un material análogo a hormigones de baja densidad.
- Someter a pruebas físicas, en laboratorios acreditados, las mezclas obtenidas con el fin de generar datos que den apertura a un diseño experimental que valide estos materiales generados, comparándolos con características de hormigones de baja densidad.
- Buscar diferentes aplicaciones de los materiales estudiados y realizar un análisis de costo beneficio de ellos.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

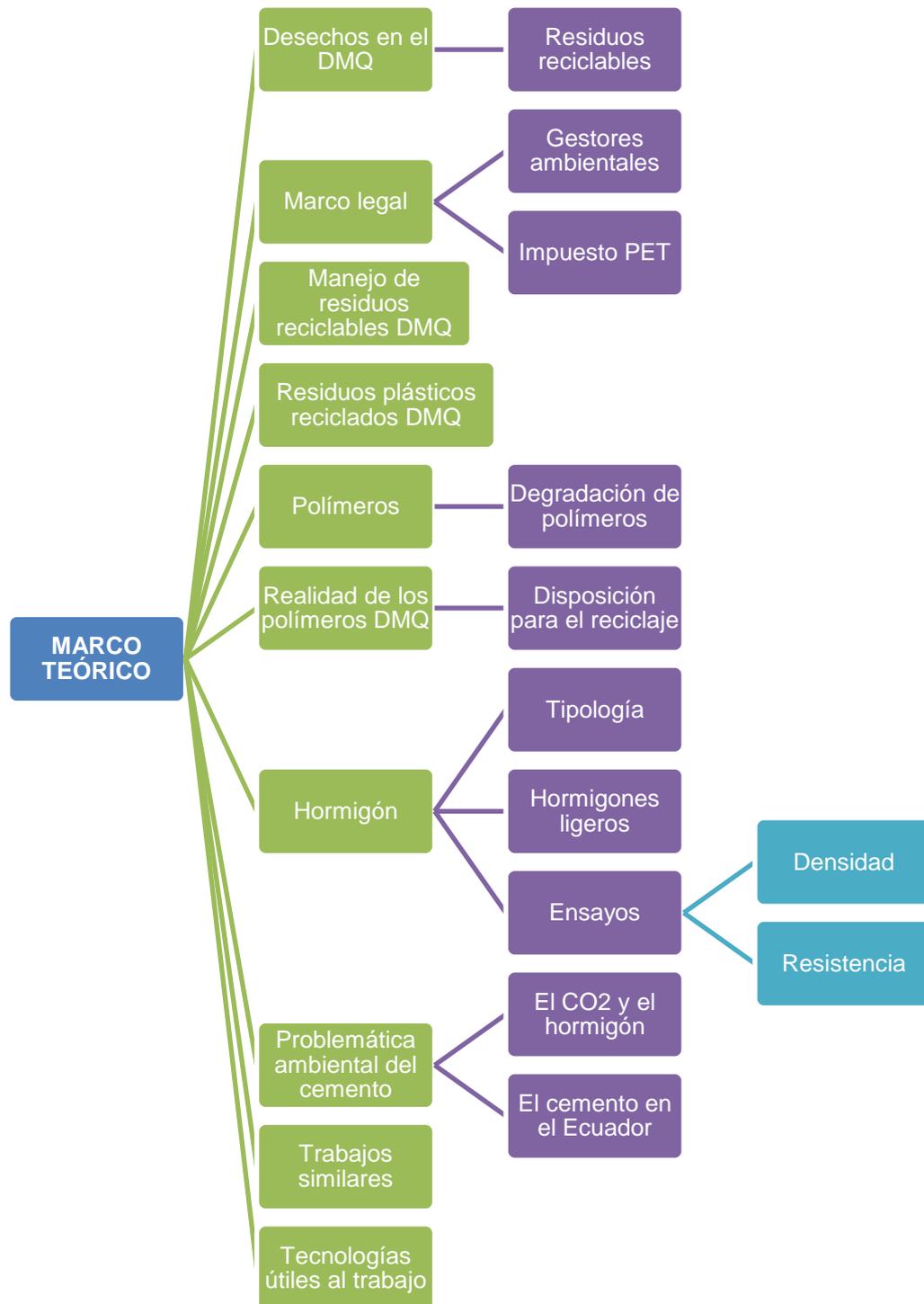


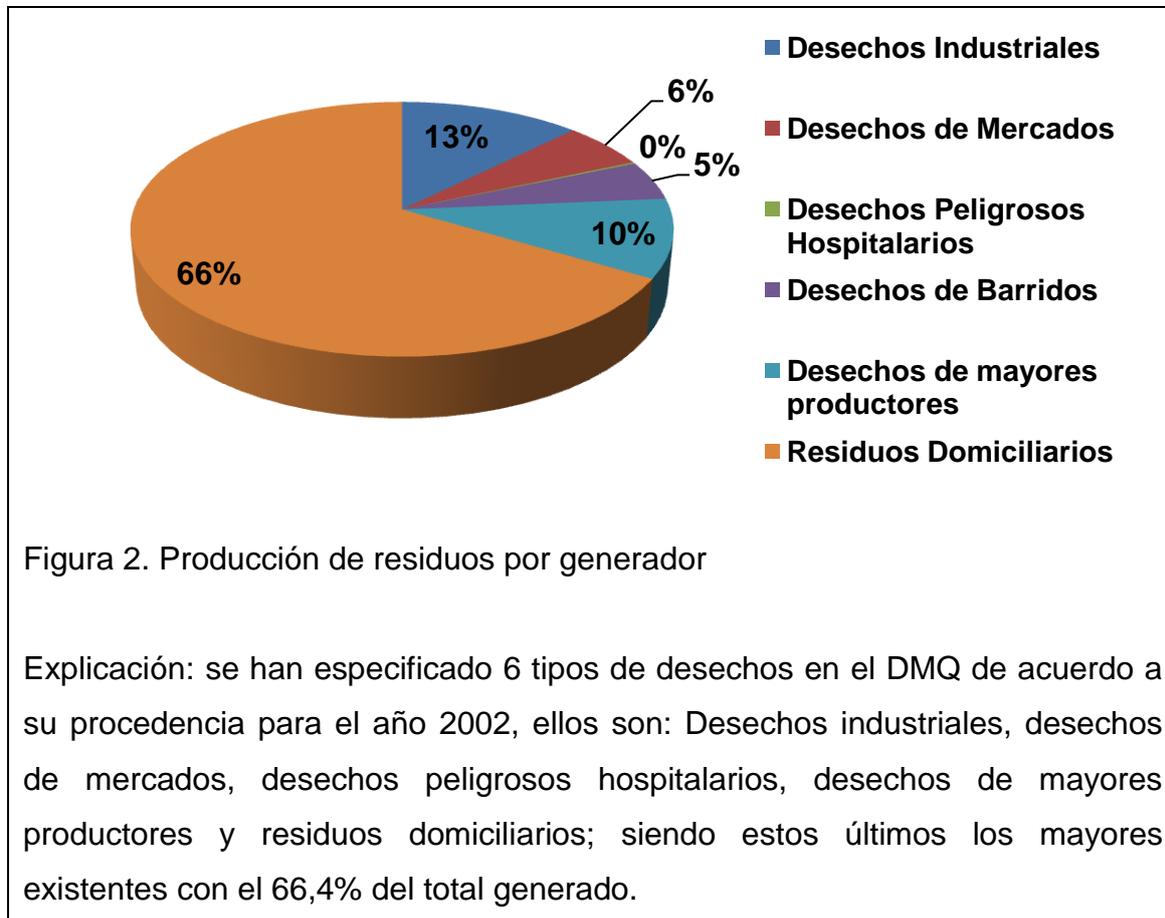
Figura 1. Resumen del marco teórico

2.1 Situación de los desechos en el DMQ

Para conocer la viabilidad del proyecto en cuestión es necesario estudiar el contexto histórico de la ciudad de Quito sobre desechos sólidos, la información expuesta proviene de entidades de carácter público que tienen como competencia la gestión de desechos sólidos en la capital ecuatoriana y de entidades privadas vinculadas a la gestión de desechos en el Distrito Metropolitano de Quito.

Quito a lo largo de su proceso de globalización va sufriendo efectos de capitales industrializadas, un indicador de este fenómeno es el remplazo de desechos de características orgánicas por desechos de características sintéticas.

Según el “Atlas Ambiental” del año 2008 de la Secretaría de Ambiente del DMQ, por datos recolectados por la empresa Termopichincha hacia el año 2002; se pudo identificar puntualmente las fuentes de generación de desechos en la ciudad, en la figura 2 podemos apreciar las distintas fuentes de generación de residuos.



Adaptado de: Atlas Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito, 2008, p. 40.

Cabe mencionar que las fuentes a continuación toman como referencia valores correspondientes a los desechos sólidos urbanos, que constituyen en este caso, desechos domiciliarios, de mercados, de barridos y de mayores productores, es decir, tienden al 87% del total de desechos en el DMQ.

Por otra parte, actualmente se estima que para el 2012 la cantidad de desechos orgánicos corresponde aproximadamente al 57% del total, seguido por los desechos reciclables con un 24% (Marcelo Castillo P., 2012, p. 21) como se puede apreciar en la figura 3.

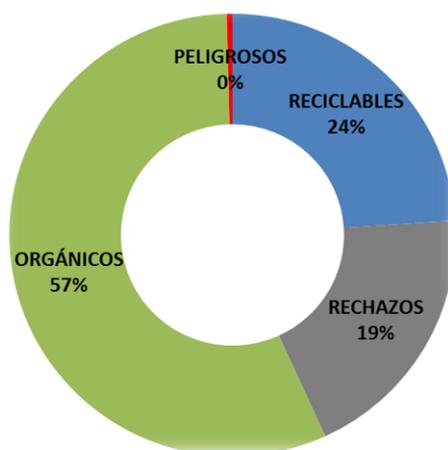


Figura 3. Tipos de residuos sólidos urbanos

Explicación: Tipología de residuos sólidos urbanos según 2012 en el DMQ. Existen cuatro, son: orgánicos, peligrosos, reciclables y rechazos (papel higiénico, restos mixtos no diferenciados).

Tomado de: Ing. Marcelo Castillo P., 2012, p. 21.

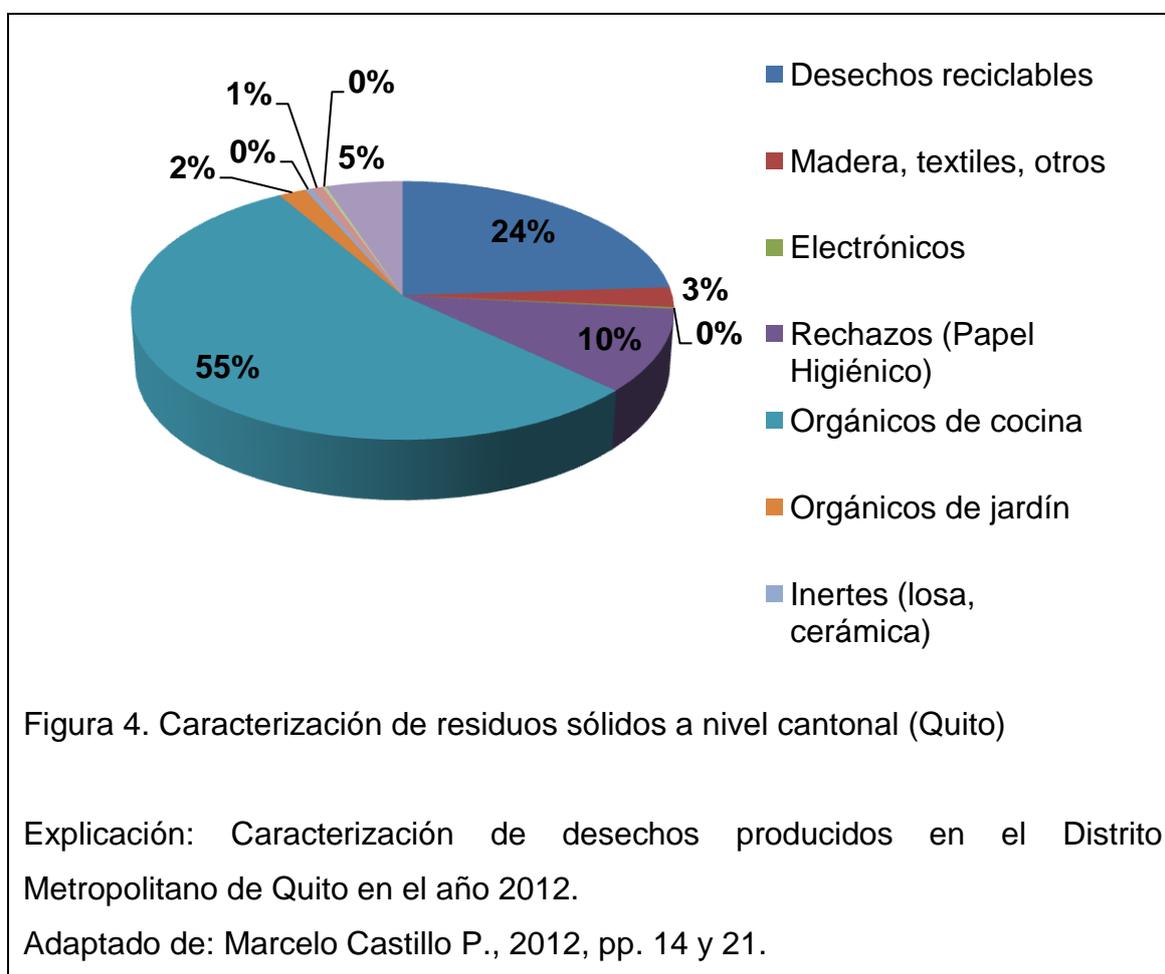
Para el año 2012 EMASO aproximó un total de 644429.45 toneladas de desechos urbanos (Marcelo Carrillo Pazmiño, 2011, p. 14), tomando referencia de las proporciones en la composición de desechos, se entiende un total aproximado de 367324.787 toneladas de desechos orgánicos y una cantidad

de desechos reciclables (vidrio, papel, cartón, plástico y metal) correspondiente a 154663.068 toneladas.

2.1.1 Residuos reciclables

La Ordenanza 332 del Distrito Metropolitano de Quito indica los componentes de los desechos que pueden ser considerados reciclables o reutilizables, ellos son: metales, papel y cartón, plásticos, y vidrio. (Ordenanza 332 del Distrito Metropolitano de Quito, 2010, p. 24).

La consultoría realizada por la Empresa Pública Metropolitana de Aseo de Quito indica textualmente la composición porcentual de los desechos, como se puede apreciar en la figura 4.



Basándose en las proporciones indicadas por EMASEO, en la tabla 1 y 2, podemos conocer el tonelaje de los distintos desechos que posee la ciudad, haciendo énfasis en los desechos reciclables.

Tabla 1. Caracterización de residuos sólidos urbanos según EMASEO

		DESCRIPCIÓN	[%]	[Ton]
RECICLABLES	PLÁSTICOS	Poliestireno (PS)	0.83	5348.76
		Polipropileno (PP)	1.65	10633.09
		Fundas plásticas (LDPE)	5.99	38601.32
		Plásticos de alta densidad (HDPE)	2.04	13146.36
		Botellas PET (PET)	1.94	12501.93
	OTROS	Cartón	2.95	19010.67
		Papel	5.62	36216.94
		Vidrio	2.08	13404.13
		Metálicos	0.86	5542.09
		Madera, textiles, otros	2.50	16110.74
		Electrónicos	0.18	1159.97
		Rechazos (Papel Higiénico)	10.39	66956.22
		Orgánicos de cocina	54.59	351794.04
		Orgánicos de jardín	1.83	11793.06
	Inertes (losa, cerámica)	0.43	2771.05	
	Compuestos	0.78	5026.55	
	Peligrosos (pilas, baterías)	0.23	1482.19	
	Menor a 1 cm	5.11	32930.34	
		TOTAL	100.00	644429.45

Explicación: Caracterización puntual de los desechos generados por el Distrito Metropolitano de Quito 2012.

Adaptado de: Marcelo Castillo P., 2012, pp. 14 y 21.

Tabla 2. Desechos reciclables según EMASEO

DESCRIPCIÓN	[%]	[Ton]
Plástico	12.45	80231.47
Papel y cartón	8.57	55227.60
Vidrio	2.08	13404.13
Metales	0.86	5542.09
TOTAL	23.96	154405.30

Explicación: Desechos reciclables del Distrito Metropolitano de Quito 2012.

Adaptado de: Marcelo Castillo P., 2012, pp. 14 y 21.

Por otra parte, la Secretaría de Ambiente indica en su Atlas Ambiental una caracterización de desechos en el distrito, como se indica en la tabla 3 y 4.

Tabla 3. Caracterización de residuos sólidos urbanos según Secretaría de Ambiente

DESCRIPCIÓN	[%]	[Ton]
Orgánicos	61.00	319107.47
Vidrio	3.20	16740.06
Plástico	13.80	72191.53
Madera	0.50	2615.64
Metales	1.20	6277.52
Papel	8.60	44988.92
Escombros	0.70	3661.89
Residuos de baño	8.00	41850.16
Textiles	2.00	10462.54
Caucho	1.00	5231.27
TOTAL	100.00	523127.00

Explicación: Caracterización puntual de los desechos generados por el Distrito Metropolitano de Quito 2007.

Adaptado de: Atlas Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito, 2008, p. 40.

Tabla 4. Desechos reciclables según Secretaría de Ambiente

DESCRIPCIÓN	[%]	[Ton]
Plástico	13.80	72191.53
Papel y cartón	8.60	44988.92
Vidrio	3.20	16740.06
Metales	1.20	6277.52
TOTAL	26.80	140198.04

Explicación: Desechos reciclables del Distrito Metropolitano de Quito 2007.

Adaptado de: Atlas Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito, 2008, p. 40.

Al comparar las dos tablas con la cantidad de RSU en Quito, tanto de EMASEO del 2012 como de la Secretaría de Ambiente del 2007, podemos apreciar la dinámica de los desechos en el DMQ. Se puede apreciar claramente la disminución de la proporción de la composición de varios residuos, pero al comparar el tonelaje total de residuos podemos ver que del año 2007 al año 2012 ha aumentado un valor aproximado del 23,19%.

Los desechos reciclables representan el 26,8% y el 23,96 % para los años 2007 y 2012 respectivamente, se observa que el desecho plástico disminuyó entre estos dos años en 3 puntos porcentuales aproximadamente, pero en el valor total en toneladas existe un aumento del desecho entre estos dos años correspondiente al 10,13%. En la composición de los desechos reciclables se evidencia la demasía de desechos plásticos, para los años 2007 y 2012 observamos que los plásticos representan del total de desechos el 13,8% y 12,45% respectivamente, a pesar de que se observa una disminución de la proporción del desecho plástico en un 1 punto porcentual aproximadamente, la cantidad total en toneladas de dicho desecho aumentó en 11,14%.

2.2 Marco legal de los desechos sólidos en el DMQ

El contexto legal en cuanto a desechos sólidos sigue normativas de carácter nacional y regional, para entender de mejor manera es necesario analizar la estructura judicial por medio de la pirámide de Kelsen para la República del Ecuador, que se aprecia en la figura 5.



Siguiendo la lógica de la estructura judicial, podemos encontrar reglamentos vinculantes con la gestión de desechos sólidos en el llamado “Texto Unificado

de Legislación Ambiental Secundaria” con sus siglas TULAS, elemento jurídico reconocido dentro de la tipología “Leyes y decretos legislativos”, es decir, es un elemento que regula a nivel nacional el manejo del ambiente.

El “Anexo 2” del “Libro VI” que refiere a la “Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados” del TULAS contiene las definiciones vinculantes y plantea los lineamientos para gestión de los desechos, tanto peligrosos como no peligrosos.

“Toda actividad productiva que genere desechos sólidos no peligrosos, deberá implementar una política de reciclaje o reúso de los desechos. Si el reciclaje o reúso no es viable, los desechos deberán ser dispuestos de manera ambientalmente aceptable.” (Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria TULAS, 2012, p. 351). La ley general para la gestión de desechos indica la creación de un sistema íntegro de gestión de desechos que busque, de manera principal, mitigar su impacto; de manera convencional el manejo de los desechos se enfoca en las conocidas 3Rs, es decir, reducir, reutilizar y reciclar los desechos posibles.

Dentro de la jurisdicción del Distrito Metropolitano de Quito, buscando cumplir la legislación, se han creado “Ordenanzas Municipales”, postuladas dentro de la pirámide legislativa en un puesto inferior a las leyes, siendo marcos legislativos para un sitio en específico; que buscan indicar expresamente como se debe manejar los desechos que se generan, tanto de características reciclables como no.

Originalmente la gestión de desechos en el DMQ estuvo regida por la Ordenanza 213 hasta finales del año 2010, cuando se expidió la Ordenanza 332 sobre “Ordenanza metropolitana de gestión integral de gestión de residuos sólidos del Distrito Metropolitano de Quito” sustituyendo el Capítulo V del Título V.

“La disposición final de residuos sólidos no peligrosos se realizará únicamente en los rellenos sanitarios autorizados por la municipalidad

(...) Los residuos sólidos que no hayan sido seleccionados y remitidos a los centros de comercialización y que por sus características ya no puedan ser procesados, deberán enviarse a un centro de disposición final (...) La municipalidad deberá mantener un registro actualizado de los posibles sitios que servirán para la disposición final de los residuos sólidos urbanos (...)” (Ordenanza 332 del Distrito Metropolitano de Quito, 2010, pp. 27 y 51).

El Municipio explica textualmente que todo desecho que ya no pueda ser catalogado deberá tener un proceso de disposición final como es el caso de los rellenos sanitarios reconocidos por la municipalidad; el municipio deberá llevar registros de control.

2.2.1 Gestores ambientales

En el Capítulo VI de la Ordenanza 332 se indican los actores encargados del reciclaje de desechos en la ciudad, denominados “Gestores Ambientales”. Se especifican tres tipos distintos de gestores ambientales:

Gestores de gran y media escala.- “Son personas jurídicas nacionales o extranjeras que se dedican a la labor de recolección, acopio, reducción, reutilización, reciclaje, comercialización y transporte de residuos sólidos dentro del Distrito Metropolitano de Quito.” (Ordenanza 332 del Distrito Metropolitano de Quito, 2010, p. 34). Se especifican dos tipologías de gestores de gran y media escala:

- “Gestores calificados de residuos generales: tratan cualquier clase de residuos no peligrosos a gran y mediana escala.” (Ordenanza 332 del Distrito Metropolitano de Quito, 2010, p. 68).
- “Gestores calificados de residuos especializados: tratan cualquier clase de residuo peligroso y no peligroso a gran y mediana escala.” (Ordenanza 332 del Distrito Metropolitano de Quito, 2010, pp. 68 y 69).

Gestores de pequeña escala.- “se reconoce la actividad de los recicladores que realizaron labores históricas de: recolección selectiva, segregación,

reciclaje y comercialización de materiales recuperados” (Ordenanza 332 del Distrito Metropolitano de Quito, 2010, p. 34). Este tipo de gestor ambiental corresponde a las personas o asociaciones que emprendía la labor de gestor ambiental (recuperar, separación, reciclaje, etc. de desechos), que realizaban esta actividad de manera informal previamente a la existencia de la ley que los regule.

La Ordenanza 332 indica tanto para los gestores ambientales de gran y mediana escala como a los gestores ambientales de pequeña escala, dentro de sus responsabilidades; presentar un informe anual de sus actividades a la Secretaría de Ambiente. (Ordenanza 332 del Distrito Metropolitano de Quito, 2010, pp. 68 y 69).

2.2.2 Impuestos a botellas PET

A partir del segundo trimestre del año 2011, la Asamblea Nacional Ecuatoriana procesa el proyecto “Ley de fomento ambiental y optimización de los ingresos del estado”, donde se busca ampliar los tributos prescritos en el impuesto a la renta. Dentro de este proyecto de ley se analiza la situación ambiental con diferentes tópicos que pueden ser representativos a la problemática ambiental local. Los tópicos son:

- Vehículos
- Actividad productiva del banano
- Bebidas alcohólicas y cigarros
- Botellas plásticas no retornables

Al ser oportuno para el desarrollo del tema de tesis, se analizará el marco legal referente a las botellas plásticas no retornables.

“Se entienden como botellas plásticas no retornables todas aquellas botellas que hayan sido fabricadas con polietileno tereftalato que no puedan volver a ser utilizadas después de haber sido consumido su contenido” (Servicio de Rentas Internas SRI, 2011, pp. 6 y 7); dichas botellas pudieron haber transportado o mantenido: “bebidas alcohólicas, no alcohólicas, gaseosas, no gaseosas y agua”. (Servicio de Rentas Internas SRI, 2011, p. 6)

Con fines de disminuir la cantidad de desechos sólidos, se llegó a estimar un valor monetario de 0.02 dólares a cada botella plástica no retornable (valor indicado por el SRI), se estima que un kilogramo de botellas PET representa aproximadamente 43.39 botellas, es decir que cada kilogramo de botellas PET representa un impuesto de 0.87 dólares. Los entes autorizados para el manejo de estos desechos son entes reconocidos por las autoridades competentes al tema ambiental (como la Secretaría de Ambiente de Quito).

Según el Gestor de Gran Escala “Reciclar Cia. Ltda.” los precios del kilogramo de PET variaban entre e 0.35 y 0.40 dólares, ahora los valores de compra y venta de este desecho superan el 1 dólar por kilogramo, y para minorar costos entre gestores ambientales de Quito, la compra y venta de este desechos se lo hace entre gestores avalados por la Secretaría de Ambiente de Quito.

2.3 El manejo de residuos reciclables en el DMQ

A pesar de que la ley referente a los desechos sólidos en el Distrito Metropolitano de Quito (Ordenanza 332) explica que, de manera anual, todos los gestores reconocidos deben presentar el total de desechos que manejaron; la Secretaría de Ambiente del DMQ, ente competente al manejo del ambiente, informó que solamente se posee el balance de residuos manejados del año 2011. Adicionalmente la Secretaría de Ambiente explicó que los datos obtenidos por los gestores ambientales son los concernientes a gestores de gran y mediana escala, explicaron que este informe puede ser fidedigno ya que la dinámica que ha tenido habitualmente los desechos en la ciudad sigue la lógica presentada en la figura 6.

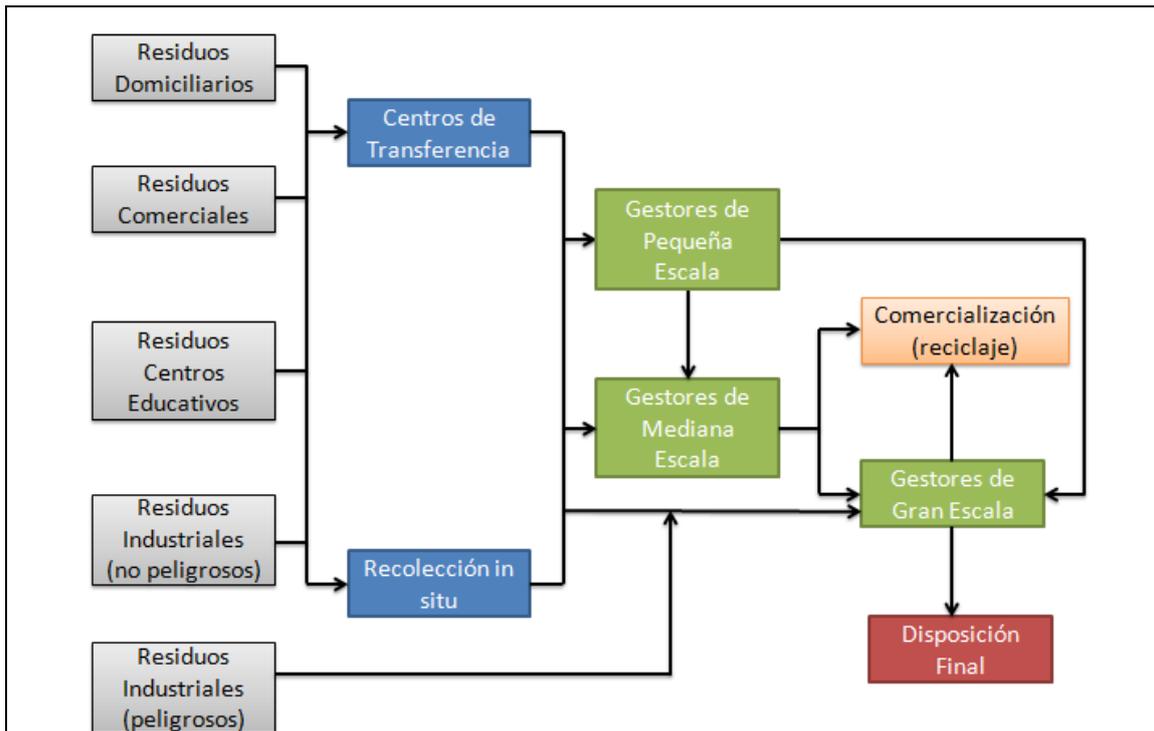


Figura 6. Dinámica de los desechos reciclados en el DMQ.

Explicación: Manejo de los desechos por parte de gestores ambientales en Quito, desde sus fuentes generadoras hasta su reciclaje o disposición final.

Adaptado de: Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, 2013.

El motivo del proceso antes indicado sobre los desechos en la ciudad, es a razón de que la tecnología necesaria para tratarlos está a disposición de los gestores ambientales de gran y mediana escala, motivo por el cual gestores ambientales de pequeña escala comercializan sus desechos directamente con los gestores antes mencionados. Adicionalmente se informó que el total de desechos manejados por los gestores tienden al 100%.

El informe de desechos de los gestores ambientales del 2011 (único informe disponible) indica los valores representados en la tabla 5 y 6. La información disponible son valores recolectados por algunos gestores de gran y mediana escala, no existe información de gestores de pequeña escala.

Tabla 5. Desechos manejados por gestores ambientales de Quito

TIPO DE RESIDUO	[Ton]	[%]
Residuos sólidos domésticos	564.70	0.46
Chatarra	108485.24	89.08
Papel-cartón	7375.63	6.06
Lodos no peligrosos	0.00	0.00
Plásticos (Exceptuando invernadero)	1229.69	1.01
Madera	0.50	0.00
Alimentos caducados	0.00	0.00
Residuos orgánicos	2932.00	2.41
Vidrio	0.00	0.00
Chatarra electrónica	309.70	0.25
Caucho (incluido neumáticos)	56.53	0.05
Aceites y grasas	263.54	0.22
Alimaya y escoria	0.00	0.00
Desechos sólidos	572.89	0.47
Lijas	0.00	0.00
Escombros	0.19	0.00
TOTAL	121790.62	100

Explicación: Total de desechos manejados por gestores ambientales de gran y mediana escala en el Distrito Metropolitano de Quito durante el año 2011.

Tomado de: Secretaría de Ambiente del DMQ, 2011.

Tabla 6. Desechos reciclables manejados por gestores ambientales de Quito

TIPO DE RESIDUO	[%]	[Ton]
Plásticos	1.01	1229.69
Papel y cartón	6.06	7375.63
Vidrio	0.00	0.00
Chatarra	89.08	108485.24
TOTAL	96.14	117090.56

Explicación: Total de desechos catalogados como reciclables, manejados por gestores ambientales de gran y mediana escala en el Distrito Metropolitano de Quito durante el año 2011.

Tomado de: Secretaría de Ambiente del DMQ, 2011.

Al comparar el desecho metálico reciclado con el desecho metálico producido para el año 2007 y 2012, podemos observar que el desecho reciclado corresponde a aproximadamente 17 y 20 veces la cantidad estimada generada por la ciudad para los años 2007 y 2012 respectivamente; para encontrar razones de este fenómeno, y al carecer de información relacionada, se puede inferir que la causalidad vienen a ser las relaciones directas que poseen los gestores ambientales con la industria, siendo ella la principal fuente de chatarra y restos metálicos. Los estudios aquí expuestos obvian el sector industrial, ya que se fijan principalmente en los Residuos Sólidos Urbanos, obteniendo así la razón de la discrepancia.

El informe del año 2011 delata que la cantidad total de desechos reciclado por gestores ambientales corresponde a 121790,62 toneladas, que corresponde al 18,9% del total de desechos, como podemos apreciar en las figuras 7 y 8.

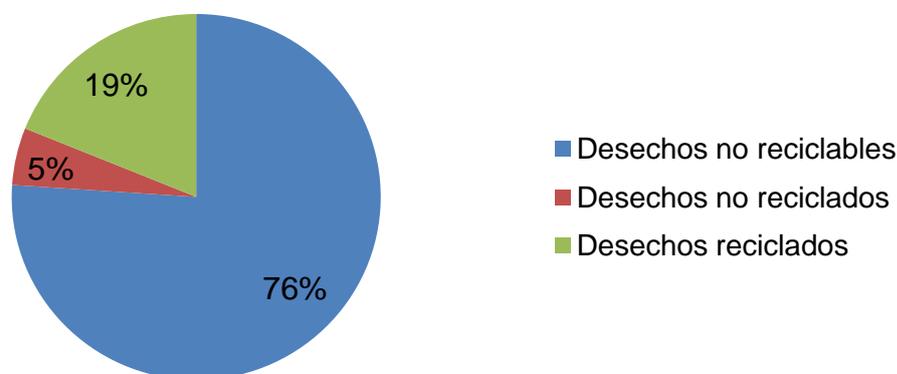


Figura 7. Desechos reciclados y no reciclados

Explicación: situación contemporánea del reciclaje de desechos en el DMQ..

Adaptado de: Marcelo Castillo P., 2012, p. 21.

Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, 2011.

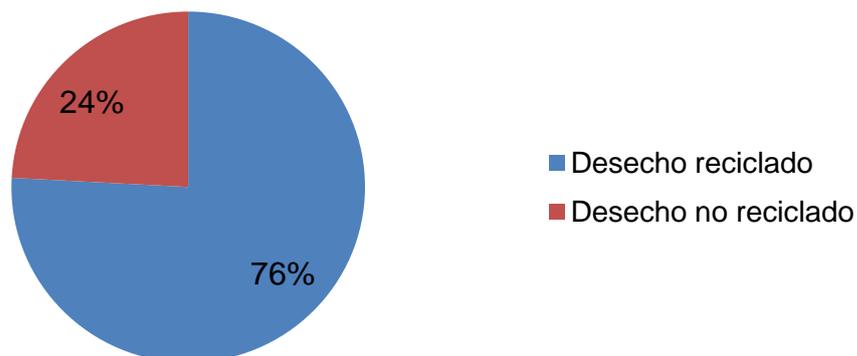


Figura 8. Desechos reciclables en Quito

Explicación: Desechos reciclables en el DMQ, situación contemporánea.

Adaptado de: Castillo P., 2012, p. 21.

Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, 2011.

La figura 8 representa la proporción de desecho reciclado en relación al desecho no reciclado. Observamos que más de las tres cuartas partes de los desechos han podido ser reciclados.

Por la accesibilidad a desechos plásticos de reciclaje por medio de gestores ambientales, la tesis en cuestión manejará como desecho reciclable los plásticos. Bajo este lineamiento, es conveniente analizar las cantidades de residuo plástico que genera la ciudad y las cantidades que actualmente los gestores calificados manejan.

2.4 Residuos plásticos reciclados en el DMQ

El DMQ ha generado para el año 2012 un aproximado de 80 mil toneladas de residuo plástico, que para términos globales de desechos representa el 12,45%.

Los desechos plásticos, dentro de los desechos reciclables, representan la mayor proporción, siendo el 52% según EMASEO para el 2012, como podemos ver en la figura 9.

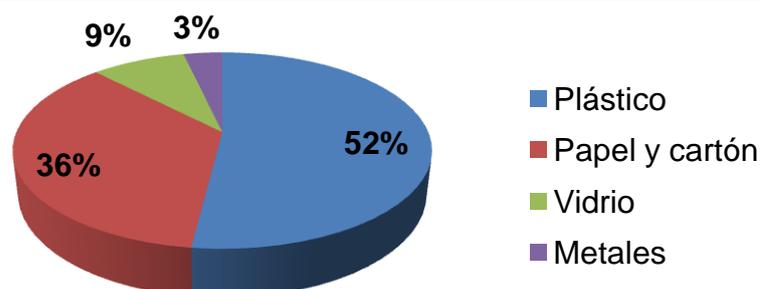


Figura 9. Tipos de desechos reciclables en el DMQ

Explicación: proporción de desechos reciclables presentes en el Distrito Metropolitano de Quito para el año 2012.

Adaptado de: Marcelo Castillo P., 2012, p. 21.

Los residuos plásticos, a pesar de representar una proporción mayoritaria dentro del total de desechos reciclables que genera el distrito, por datos de control manejados por la Secretaría de Ambiente, estos desechos no son los que poseen mayor tasa de reciclaje; en la figura 10 observaremos el porcentaje de reciclaje según el tipo de residuo.

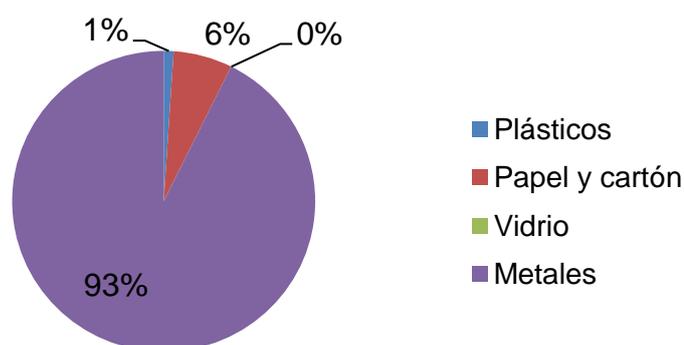


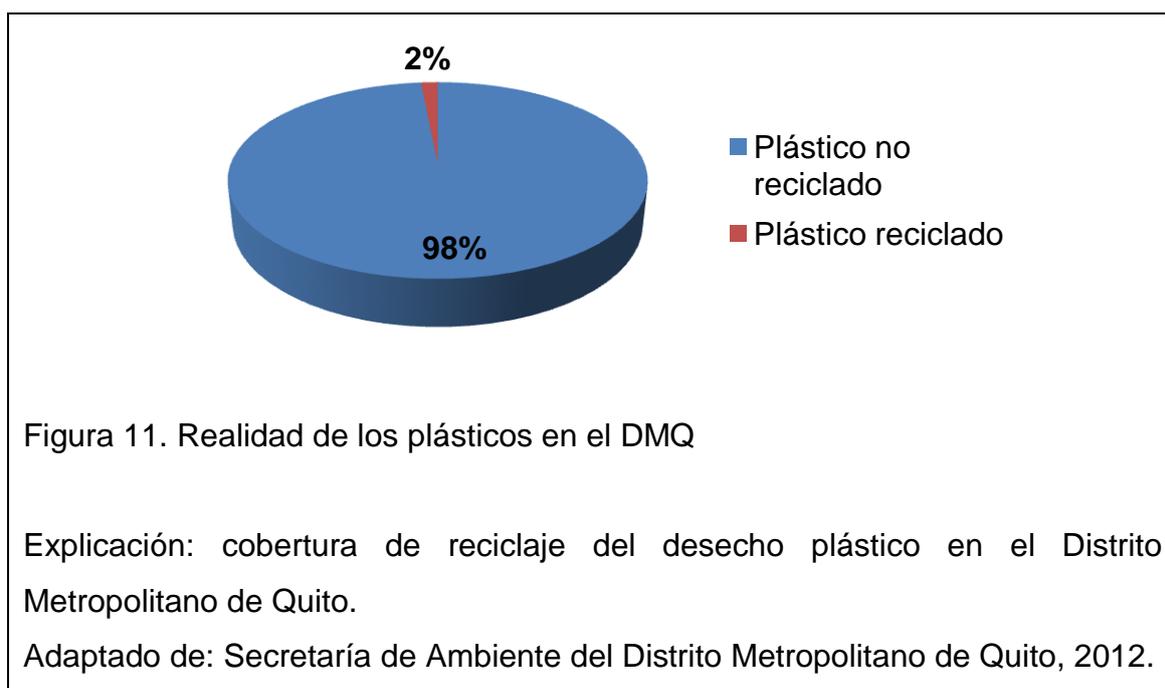
Figura 10. Tipos de desechos reciclados en el DMQ

Explicación: proporciones de reciclaje por tipo de residuo para el año 2012.

Adaptado de: Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, 2012.

Como podemos observar el desecho con mayor tasa de reciclaje corresponde al desecho metálico, llegando a reciclar el 93% del total de desechos reciclados, seguido por papel y cartón con el 6%, por plásticos con el 1%, y finalmente por vidrio, pudiendo reciclar de este un valor cercano al 0% del total de desecho reciclado.

La Secretaría de Ambiente en su informe de gestores ambientales indica que el total de residuo plástico que fue procesado en reciclaje es de 1229,7 toneladas para el 2012, en Quito EMASEO estimó que para el mismo año se generaron aproximadamente 80.241,5 toneladas de desecho plástico, por lo tanto en la actualidad la ciudad posee una capacidad de reciclaje de desecho plástico de aproximadamente 1,5% como podemos observar en la figura 11.



Al conocer que existe un máximo del 2% de reciclaje de desecho plástico con respecto a la totalidad de este desecho en específico, se puede concluir que el 98% restante (79.001 toneladas) no ha recibido un proceso de manejo y por ende termina en rellenos sanitarios reconocidos por el municipio o en botaderos informales, por lo tanto existe una potencialidad relevante en este desecho desaprovechado.

Al haber analizado la problemática detrás de los desechos plásticos, a continuación se explicará la base teórica concerniente a los polímeros, mayormente conocidos como “plásticos”.

2.5 Codificación de los plásticos o polímeros utilizados por industria y encontrados en los desechos

A los polímeros o comúnmente conocidos como plásticos, se los ha clasificado por “El tipo de aplicación en relación a sus propiedades mecánicas y térmicas”. Dentro de este grupo encontramos los siguientes tipos de polímeros (Llorenz Molina J., 2012, diapositiva 7):

- Termoplásticos: polímeros maleables en presencia de altas temperaturas y presión (Cornish Álvarez M., 1997, p. 22). Dentro de esta tipología de polímeros encontramos diferentes plásticos utilizados ampliamente en la industria (Llorenz Molina J., 2012, diapositiva 11).
- Termoestables: En presencia de calor y presión, conjunto con un catalizador, los polímeros no son deformables y se mantienen íntegros. (Cornish Álvarez M., 1997, p. 23).
- Elastómeros: es un conjunto de polímeros que pueden deformarse hasta 30 veces su tamaño, pueden ser termoplásticos o termoestables. (Cornish Álvarez M., 1997, p. 25)
- Fibras: son polímeros dispuestos de a manera de fibra para alcanzar una resistencia a fuerzas exógenas. (Llorenz Molina J., 2012, diapositiva 14).

Para entender de mejor manera la clasificación de los polímeros en base a su aplicación, en la tabla 7 se aprecian los distintos polímeros con sus respectivas aplicaciones.

Tabla 7. Tipificación de los polímeros por aplicación.

TIPO	MATERIAL	APLICACIONES
Termoestables	Resina poliéster	Encapsulados, láminas acanaladas
	Resina fenólica	Apagadores de luz
	Resina melamínica	Vajillas
	Poliuretano	Colchones, espumas y rellenos de muebles
Termoplásticos	Polietileno tereftalato (PET)	Botellas, envases termoformados
	Polietileno de baja densidad (LDPE)	Bolsas
	Polietileno de alta densidad (HDPE)	Bolsas tipo papel, tuberías, cubetas, macetas, botellas
	Cloruro de polivinilo (PVC)	Juguetes, tubería, cable eléctrico, mangueras, tarjetas de crédito
	Polipropileno (PP)	Recipiente de comida, sillas para jardín, películas, filamento para pañal, ganchos
	Poliestireno (PS)	Estuches de cosméticos, envases termoformados
	Acrilonitrilo-butadieno-estireno	Carcasas de teléfonos, batidoras, licuadoras, electrodomésticos
Nylon	Engranajes, ruedas de patines	
Elastómeros	Caucho sintético, látex, neopreno	Neumáticos, guantes, trajes especiales impermeables
Fibras	Poliamidas y poliésteres	Tejidos impermeables, tejidos de alta resistencia, mallas para invernaderos

Explicación: polímeros por el tipo de aplicación, y ejemplo de algunos usos de los distintos polímeros.

Tomado de: Chacón Guerra E. y Lema Carrera G., 2012, p. 41.

“The Society Plastic Industry” (SPI) la entidad encargada de desarrollar una codificación de resinas plásticas más usadas con el fin de poder reciclarlas; hacia el año 2008 SPI comenzó a trabajar con ASTM, líder mundial en creación de normativas técnicas, creando así un fundamento normativo para la especificación de las diferentes resinas utilizadas habitualmente en el mercado” (The Society of the Plastic Industry, 2013).

Tabla 8. Codificación de los polímeros habitualmente utilizados

SIMBOLOGÍA	TIPO DE PLÁSTICO	RECOMENDACIONES	USOS COMUNES
 PET	PET Polietileno Tereftalato	Diseñados para un solo uso, al no ser así genera riesgo de filtraciones y bacterias	Botellas para alimentos.
 HDPE	HDPE Polietileno de alta densidad	De uso amplio e inocuo al uso.	Fundas, botellas para alimentos., tubos, aislantes eléctricos, juguetes.
 PVC	PVC Policloruro de vinilo	Evitar, de alto riesgo al ser usado con alimentos, puede intoxicarlos.	Envolturas para materiales, tubería, zapatos, mangueras, tarjetas electrónicas.
 LDPE	LDPE Polietileno de baja densidad	De uso amplio e inocuo al uso.	Fundas, botellas para alimentos., tubos, aislantes eléctricos, juguetes.
 PP	PP Polipropileno	De uso amplio e inocuo al uso.	Alfombras, botellas para uso amplio, cuerdas, juguetes envolturas.
 PS	PS Poliestireno	No es recomendable almacenar en periodos extensos alimentos, se utiliza en mayor cantidad para el embalaje de materiales.	Aisladores de espuma, vasos de bebidas calientes, materiales de empaque, empaquetado.
 OTHER	Otro	Utilizado mayormente en el embalaje de productos, no se recomienda para alimentos.	Empaquetado, botellas para materiales no alimenticios, cuerdas, mangueras.

Explicación: codificación de polímeros, recomendaciones de uso y uso general

Adaptado de: Ralph a. Burns, 2003, pág. 598.

Chacón Guerra E. y Lema Carrera G., 2012, p. 43.

The Society of the Plastic Industry, 2013.

2.5.1 Degradación de los plásticos ocupados en la industria

Uno de los problemas más conocidos por parte de los elementos sintéticos plásticos es su capacidad para mantenerse inocuos en el ambiente por amplio períodos de tiempo; la razón es que al permanecer en esta forma su manejo es

complicado, ya que su reciclaje para los mismos fines por los que fue creado, es más costoso que adquirir el mismo material nuevo.

En la tabla 9 se indicarán los tiempos de vida del material en el ambiente, es decir, su degradación natural.

Tabla 9. Tiempo de degradación natural de algunos polímeros

CODIFICACIÓN		PLÁSTICO	TIEMPO DE VIDA [años]
1	PET	Polietileno tereftalato	100-1000
2	LDPE	Polietileno de baja densidad	150-1000
3	PVC	Policloruro de vinilo	>100
5	PP	Polipropileno	400-600
6	PS	Poliestireno	1000

Explicación: Tiempo de vida de algunos polímeros comúnmente utilizados.

Adaptado de: Alonso M., Lozano A., Madregal S., Vilte E., Apaza A. y Saravía J., 2001, p. 4.

Centro de educación y capacitación para el desarrollo sostenible de la Universidad Autónoma de Zacatecas “Francisco García Salinas”

2.6 Realidad de distintos polímeros en el Distrito Metropolitano de Quito

Como pudimos apreciar, los plásticos para un uso directo se los ha codificado en 7 grupos que poseen características específicas, como veremos a continuación, dentro de los residuos sólidos de Quito podemos encontrar 5 tipos de polímeros diferenciados:

PET: Poliestireno Tereftalato de codificación 1. Presente en forma de botellas y recipientes de alimentos.

HDPE: Polietileno de alta densidad de codificación 2. En forma de recipientes y botellas para alimentos y otros materiales.

LDPE: Polietileno de baja densidad de codificación 4. Mayoritariamente en forma de fundas.

PP: Polipropileno de codificación 5. Lo encontramos en materiales plásticos varios, como, recipientes para alimentos y no, utensilios de cocina, fundas de alimentos, en capuchones para rosas en la industria florícola.

PS: Poliestireno de codificación 6. Lo encontramos en su forma expandida, comúnmente conocido como “espuma flex”; utilizado en transporte y vasos para bebidas calientes.

Gracias a la consultoría sobre la caracterización de los RSU en el DMQ del 2012 por parte de EMASO, en la figura 12 y la tabla 11 se especifica las proporciones de los distintos polímeros que constituyen el desecho plástico.

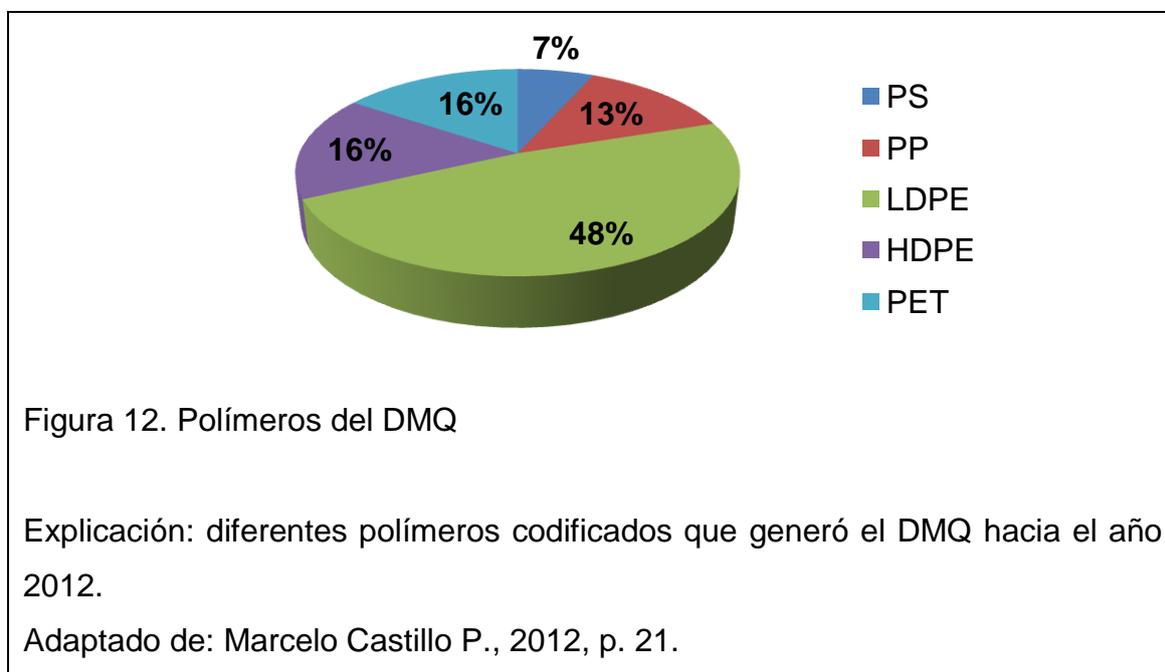


Tabla 10. Polímeros del DMQ

DESCRIPCIÓN	[%]	[Ton]
Poliestireno (PS)	6.67	5348.76
Polipropileno (PP)	13.25	10633.09
Fundas plásticas (LDPE)	48.11	38601.32
Plásticos de alta densidad (HDPE)	16.39	13146.36
Botellas PET	15.58	12501.93
TOTAL	100.00	80231.47

Explicación: diferentes tipologías de desechos plásticos que el Distrito Metropolitano de Quito generó hacia el año 2012.

Adaptado de: Marcelo Castillo P., 2012, p. 21.

Vemos que el polímero más reciclado representa el polietileno de baja densidad (LDPE) con el 48% del total de desecho reciclable, polímero comúnmente utilizado para la elaboración de fundas; le sigue el polietileno de alta densidad (HDPE) con el 16%, comúnmente usado para la fabricación de recipientes; las botellas de polietileno tereftalato (PET) representan el tercer puesto con el 16% aproximadamente; el polipropileno (PP), polímero de alto espectro en uso representa el 13%; y finalmente el poliestireno expandido (PS), comúnmente conocido como “espuma flex” representa en los residuos reciclados el 7% aproximadamente.

Ya con el conocimiento de la composición del desecho reciclable con respecto al desecho plástico, fue necesario conocer de manera clasificada el reciclaje de este residuo; la disponibilidad a esta información fue poco accesible, la razón es que el registro puntualizado de los plásticos reciclados no es obligación de los gestores hacia la Secretaría del Ambiente del DMQ (la ley no especifica un reporte a ese nivel de detalle), por lo tanto para entender la situación se pidió de manera directa información a gestores ambientales de gran y media escala, que sean representativos con la gestión de plásticos. La apertura a la información fue limitada, obteniendo finalmente información recurrente del gestor ambiental de gran escala “Reciclajes M y S”, gestor ambiental de gran escala que en el año 2012 y en la actualidad se encuentra acreditado para su funcionamiento, y es el único de tipología de gran y mediana escala que maneja desechos de poliestireno (espuma flex).

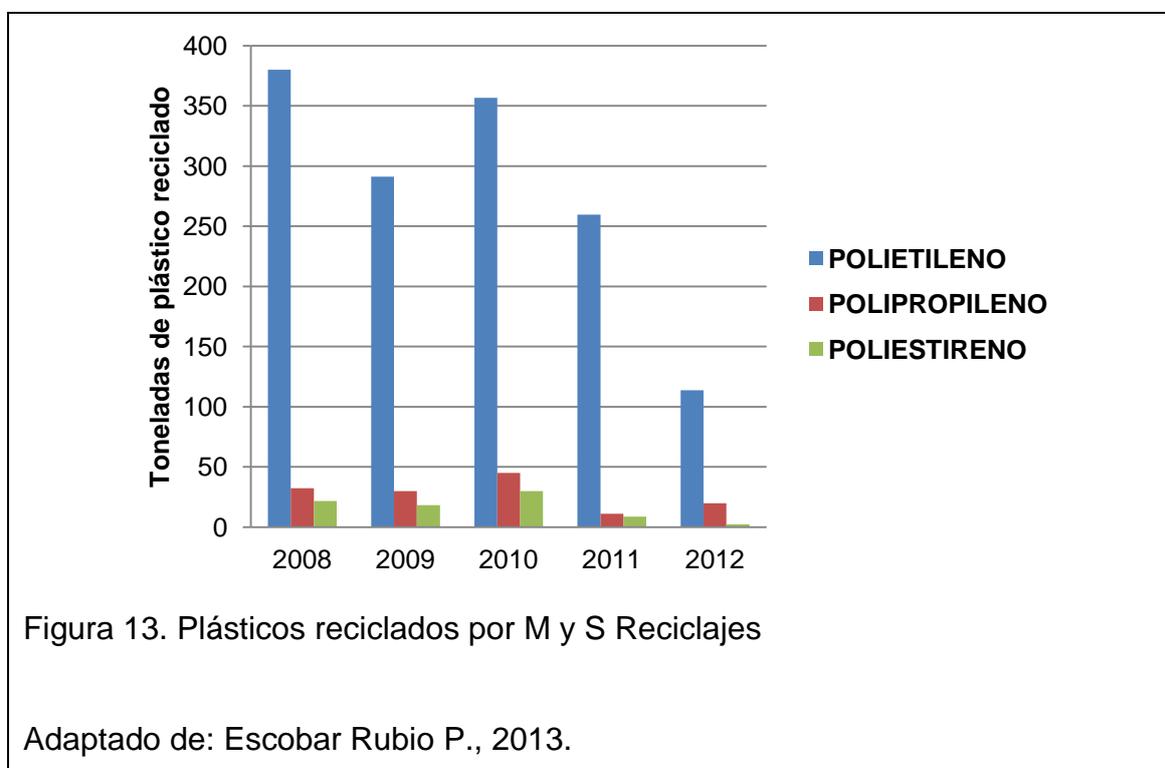
En la tabla 11 y figura 13 se puede apreciar los totales anuales de los desechos manejados por el gestor ambiental Reciclajes M y S.

Tabla 11. Plásticos reciclados por M y S Reciclajes

AÑO	POLIETILENO	POLIPROPILENO	POLIESTIRENO
2008	379.891	32.291	21.654
2009	291.255	29.999	18.349
2010	356.611	44.933	29.955
2011	259.552	11.181	8.754
2012	113.714	19.682	2.345
TOTAL	1401.023	138.086	81.057

Explicación: registro histórico de materiales reciclables plásticos por los últimos 5 años del gestor ambiental Reciclajes M y S.

Adaptado de: Escobar Rubio P., 2013.



El gestor ambiental “Reciclajes M y S” indica que a lo largo de sus últimos 5 años, ha manejado un total de 1401,02 toneladas de polietileno de baja densidad (LDPE); 138,09 toneladas de polipropileno (PP) y finalmente 81,06 toneladas de poliestireno (PS).

Como ya se explicó, el gestor ambiental “Reciclajes M y S” es hasta el momento, el único gestor ambiental avalado que dentro de su gestión procesa poliestireno. Por esta razón la comparación de totales de desecho de poliestireno reciclable con el total del poliestireno reciclado por esta empresa hacia el año 2011, es un indicador del porcentaje de reciclaje anual que en la ciudad se produce del material. Para la comparación se utilizará el promedio de los últimos 5 años de manejo del desecho de poliestireno. En la tabla 12 y figura 14 se puede ver la cantidad de poliestireno que se ha logrado manejar.

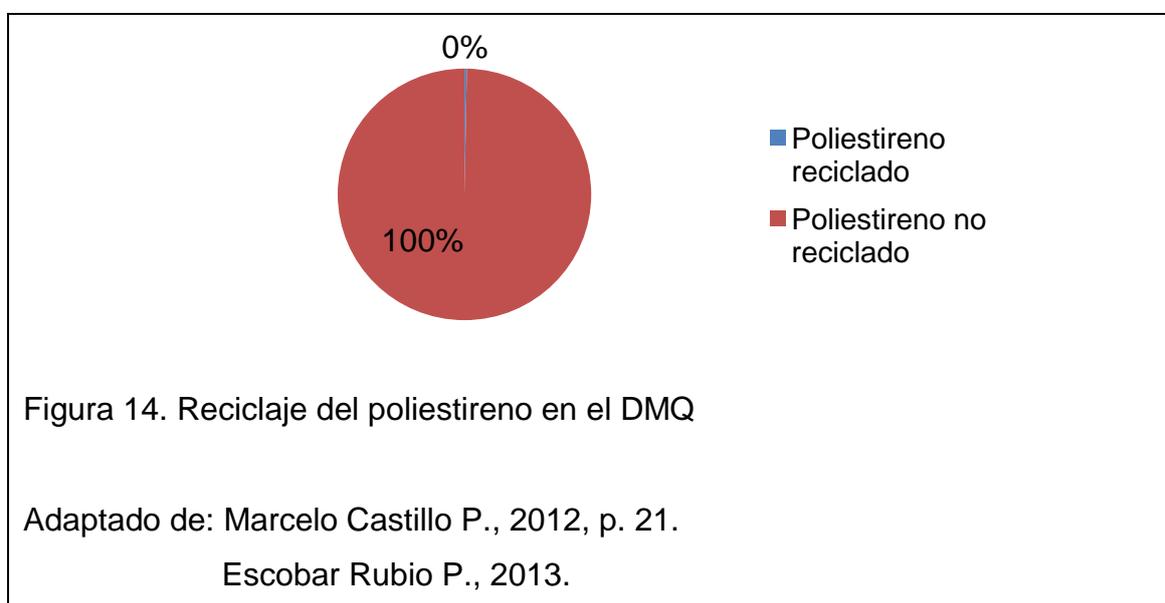
Tabla 12. Reciclaje del poliestireno en el DMQ

DESCRIPCIÓN	[%]	[Ton]
Poliestireno reciclable	100.0000	5348.7644
Poliestireno reciclado	0.3031	16.2114
Poliestireno no reciclado	99.6969	5332.5530

Explicación: total de poliestireno reciclado aproximado para el año 2012.

Adaptado de: Marcelo Castillo P., 2012, p. 21.

Escobar Rubio P., 2013.



La tabla 12 y figura 14 explican la capacidad que posee en este instante la ciudad para reciclar poliestireno (PS), vemos con claridad que del total de este polímero que genera la ciudad, el 99,69% es desaprovechado.

Con relación al PET y HDPE el reciclaje es considerablemente alto, aunque no se pudo recopilar información puntual sobre las cantidades de desechos reciclados, en la lista de gestores avalados por la Secretaría de Ambiente del DMQ existe en promedio 10 gestores ambientales manejando este tipo de desechos.

En relación a otros polímeros codificados, es decir: PVC y otros, la información es nula.

2.6.1 Disposición para el reciclaje de desechos plásticos en el DMQ

A lo largo de la investigación efectuada para el trabajo de titulación en curso, se ha podido entender la manera en que los desechos sintéticos plásticos en el Distrito Metropolitano de Quito se han manejado; es de suma importancia conocer como las distintas entidades concernientes al manejo del desecho plástico reciclable, han dispuesto sus desechos para poder ser reintroducidos en la industria.

Puntualmente, al haber tenido acercamiento a los gestores ambientales en la ciudad, podemos indicar que el proceso mayormente utilizado para el reciclaje de los desechos, póstumo a su caracterización, es la extrusión, procedimiento que se explicará en el apartado 2.1.10.

2.7 Hormigón

“El hormigón o concreto es un conglomerado pétreo artificial, que se prepara mezclando una pasta de cemento y agua, con arena y piedra triturada, grava u otro material inerte. La sustancia químicamente activa de la mezcla es el cemento, el cual reacciona física y químicamente con el agua y al endurecer liga los agregados” (Harry Parker, 1981, p. 21). En términos generales se puede entender al hormigón como una mezcla entre un agregado inerte que puede ser grueso (piedra, grava) y/o fino (arena, chispa), con agua y cemento (elemento aglutinante).

Para entender de mejor manera la granulometría del agregado podemos apreciar la tabla 13.

Tabla 13. Granulometría de los agregados para hormigón

Número de agregado	Diámetro de partícula	
	[mm]	[pul]
1	90 - 37.5	3 ½ - 1 ½
2	63 - 37.5	2 ½ - 1 ½
3	50 - 25	2 a 1
357	50 - 4.75	2 - No 4
4	37.5 - 19.0	1 ½ - ¾
467	37.5 - 4.75	1 ½ - No 4
5	25.0 - 12.5	1 - ½
56	25.0 - 9.5	1 - ⅜
57	25.0 - 4.75	1 - No 4
6	19.0 - 9.5	¾ - ⅜
67	19.0 - 4.75	¾ - No 4
7	12.5 - 4.75	½ - No 4
8	9.5 - 2.36	⅜ - No 8
89	9.5 - 1.18	⅜ - No 16
9	4.75 - 1.18	No 4 - No 16

Explicación: clasificación de los agregados finos y gruesos para formulación de hormigones.

Adaptado de: American Society for Testing and Materials ASTM C33, 2003, p. 3.

2.7.1 Tipología el Hormigón

Según la Escuela de Ingeniería Técnica Civil de la Universidad Politécnica de Cartagena, al hormigón se lo ha podido catalogar en relación a distintos contextos; en la tabla 14 se indican y describen ciertas tipologías que ha tomado el hormigón.

Tabla 14. Tipologías de hormigón

TIPOS DE HORMIGÓN		DESCRIPCIÓN	
HORMIGONES CONVENCIONALES	Por sus propiedades	Generales	Existen dos tipos generales, hormigón en masa y estructural (hormigón en masa más metal)
		Por su resistencia	La EHE establece una serie de valores nominales para la resistencia del hormigón medidos en [N/mm ²], ellos son: 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50.
		Por su endurecimiento	La EHE los clasifica por la rapidez de su endurecimiento en función del hormigón utilizado y su relación agua/cemento (ha tabulado su comportamiento, calificándolos como hormigones rápidos y normales).
		Por su docilidad	La EHE clasifica a los hormigones por su consistencia (seca, plástica, blanda, fluida) y por su asentamiento en cm. La docilidad es la interacción tabulada entre las dos variables antes mencionadas.
	Según el tipo de armado	Hormigón armado	Son hormigones en masa (agua, cemento y áridos) más estructuras metálicas pasivas.
		Hormigón pretensado	Son hormigones en masa (agua, cemento y áridos) más estructuras metálicas activas.
	Según el tipo de propiedad adicional		Hormigones con aditivos en su composición para alcanzar propiedades específicas.
	Según el carácter de los materiales		Existen hormigones que en su composición se añaden materiales que de residuo o desecho, es decir, hormigones con connotaciones medioambientales.
	Por el sitio de elaboración	En la obra	Hormigones fabricados in situ, generalmente para demandas menores
		En la central	Hormigones fabricados ex situ, demandas mayores.
Hormigón prefabricado		Se refiere a plataformas o estructuras prediseñadas para fines específicos.	
HORMIGONES ESPECIALES	Hormigones ligeros	Hormigones que poseen densidades relativamente bajas, aligerados por la adición de aire de ciertas dimensiones o de áridos con características livianas.	

Hormigones con fibras		Son hormigones hechos con cemento que contiene áridos finos, gruesos y fibras discontinuas (artificiales o naturales), para alcanzar durezas altas aumentando la resistencia a la deformación (en composición tienen del 1 al 5% de fibra).
Hormigones con polímeros	Hormigón impregnado	Hormigones que contienen polímeros añadidos por procesos de radiación, poseen alta resistencia a tracción, compresión e impacto. Tienen costos altos.
	Hormigón polímero	Hormigón que se forma al polimerizar un monómero con árido a temperatura ambiente. Son durables y resistentes a congelación y deshielo, abrasión e impacto.
Hormigón proyectado		Hormigones que son proyectados por manguera a presión para colocarlos en superficies inclinadas, o techos; el hormigón se compacta al impactar con la superficie a la que va adherido.
Hormigón pesado		Hormigones utilizados como protección, una aplicación puntual es en plantas nucleares; estos hormigones utilizan áridos de pesos específicos especiales.

Explicación: Algunas tipologías del hormigón, catalogadas en base a hormigones comúnmente utilizados (convencionales) y hormigones con fines específicos (especiales).

Adaptado de: Escuela de Ingeniería Técnica Civil de la Universidad Politécnica de Cartagena, 2007, pp. 82-97.

2.7.2 Hormigones ligeros

Como pudimos apreciar en la tabla anterior, los hormigones considerados ligeros o livianos, son hormigones de tipología especial. Al ser estos materiales relevantes dentro de este trabajo de titulación, a continuación se analizará el contexto de este tipo de hormigones, viendo sus características y tipologías.

“Los hormigones ligeros son hormigones de densidades menores a las de los hormigones comunes” (Escuela de Ingeniería Técnica Civil de la Universidad Politécnica de Cartagena, 2007, p. 88). Para disminuir su densidad, se emplean métodos en su proceso de fabricación. (Valdez L. y Suarez G., 2010, p.15).

Para definir de manera técnica a estos materiales, en la tabla 15 se exhiben los rangos de densidades que poseen los hormigones.

Tabla 15. Hormigones según su densidad

HORMIGÓN	DENSIDAD [kg/m ³]
Hormigones livianos	300-1900
Hormigones convencionales	≈ 2400
Hormigones pesados	> 2400

Explicación: Clasificación de los hormigones en base a su densidad

Tomado de: Valdez L. y Suarez G., 2010, p. 19.

Vemos que los hormigones considerados livianos o alivianados poseen densidades promedio entre 300 y 1900 kg/m³; en base a esta información podemos diferenciar diversos tipos de hormigones considerados livianos en la tabla 16.

Tabla 16. Clasificación de los hormigones livianos

TIPOLOGÍA		DESCRIPCIÓN
Por su aplicación	Hormigón de relleno	300-1000 kg/m ³ . Aislantes térmicos, de bajas resistencias.
	Hormigón aislante	<800 kg/m ³ . Resistencias entre 0.7-7 Mpa.
	Hormigón estructural de alto desempeño	De 25 a 30% más liviano que el hormigón convencional (<184 kg/m ³); resistencias de <17 Mpa.
Por su tipo de producción	Hormigón de agregado	Agregados livianos porosos
	Hormigón aireado, celular, espumoso o gaseoso	Posee vacíos de aire (burbujas).
	Hormigón sin finos	No posee agregados finos.

Explicación: clasificación de hormigones livianos con su respectiva descripción.

Tomado de: Valdez L. y Suarez G., 2010, pp. 19-22.

Tomando como referencia la tabla antes presentada se puede entender que las resistencias para hormigones ligeros oscilan entre 0,7 a 17 MPa (7,14 a 173,35 kg/cm²).

El material en investigación del trabajo de titulación en curso, al tratarse de un hormigón aligerado con polímeros sintéticos (plásticos), tiene analogía a hormigones livianos de agregado, es decir, hormigones aligerados con áridos sintéticos.

Adicionalmente, y para definir la potencialidad de los hormigones alivianados, es necesario conocer las ventajas e inconvenientes que conlleva este tipo de material.

Ventajas:

Disminuye peso en estructuras
 Características térmicas y acústicas
 deformaciones
 No necesita compactación
 Fraguado uniforme

Desventajas:

Mayor costo de materiales
 Mayor incidencia de
 Mayor contracción al secado

Considerando sus ventajas se han podido identificar como sus principales aplicaciones las siguientes:

- “Hormigón ligero estructural: en función a una resistencia mínima, una densidad no mayor a 1840 kg/m³ en estado seco” (Valdez L. y Suarez G., 2010, p. 89)
- En mampuestos o bloques (Valdez L. y Suarez G., 2010, p. 89).
- “Hormigón aislante: son hormigones livianos de la menor densidad existente y con una conductividad térmica menor a 0,3 J/m²/s °C/m” (Valdez L. y Suarez G., 2010, p. 89).

2.7.3 Ensayos físicos para conocer la validez del hormigón

Para validar un hormigón es necesario que cumpla con ciertos parámetros técnicos de calidad. En Ecuador, el organismo competente a gestión de calidad es el Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN.

Dentro de los hormigones livianos existen principalmente dos parámetros que se deben analizar, ellos son: densidad y resistencia.

Para poder medir los parámetros antes indicados, es necesario preparar muestras de hormigón descritas en la norma INEN “Hormigón de cemento hidráulico. Muestreo” (NTE INEN 1763, 2010). Esta norma indica expresamente que la fabricación del material muestral debe considerar (no prevé muestras a pequeña escala, es decir, no indica métodos de fabricación manual):

“El tiempo transcurrido entre la obtención de la primera y la última porción de la muestra no debe exceder 15 minutos” (NTE INEN 1763, 2010, p. 2)

“El volumen mínimo de la muestra debe ser de 28 litros, su tamaño debe definirse por el tamaño máximo del árido” (NTE INEN 1763, 2010, p. 2)

La disposición de las muestras a analizar debe ser en moldes cilíndricos según la norma del Instituto Nacional de Normalización NTE INEN 2662. En la figura 15 se observa un molde cilíndrico reutilizable utilizado para la fabricación de muestras de hormigón para pruebas de compresión.



Figura 15. Molde de núcleos o cilindros de hormigón

La norma especifica las siguientes pautas para los moldes cilíndricos para muestras de hormigón:

- Pueden ser reutilizables o no.
- Deben ser fabricados de materiales inocuos al hormigón, impermeables y resistentes al uso.
- Sus bordes deben ser ángulos rectos.
- Su altura debe ser el doble de su diámetro.
- La superficie inferior, o fondo, no debe desviarse más del 1% del diámetro del molde.
- Los moldes reutilizables deben estar provistos de un cierre o una base en su extremo inferior formando un ángulo recto.
- No deben tener fugas de agua.

(NTE INEN 2662, 2013, pp. 1 y 2)

2.7.3.1 Densidad

El Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, especifica que el cálculo de la densidad debe seguir la fórmula 1:

Fórmula 1. Densidad de la muestra cilíndrica

$$D = \frac{Mc - Mm}{Vm}$$

Donde:

D es densidad [kg/cm^3]

Mc es masa del molde lleno de hormigón [kg]

Mm es masa del molde [kg]

Vm volumen del molde [cm^3]

Tomado de: NTE INEN 1579, 2013, p. 4.

Por lo tanto el Instituto Ecuatoriano de Normalización explica que para medir la densidad se deben medir las masas de las muestras de hormigón ya ubicadas en el molde (como antes se explicó), la masa del molde sin muestra de hormigón y el volumen que ocupa el molde. Las mediciones de la masa de las muestras deben hacerse con una balanza de precisión.

2.7.3.2 Resistencia

El cálculo de la resistencia de las muestras de hormigón está regulado por el INEN; para conocer la resistencia de un hormigón se indica que se debe hacer el denominado “ensayo de compresión”. “Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindro de hormigón a una velocidad definida.” (NTE INEN 1573, 2010, p. 3) el método de compresión de hormigón consiste en aplicar una fuerza regulada a una muestra cilíndrica de hormigón con la ayuda de una “máquina de ensayo” calibrada.

La máquina de compresión genera paulatinamente fuerzas controladas sobre una muestra específica (en este caso en un cilindro de hormigón) con el fin de encontrar la resistencia de un material; la máquina de compresión genera datos medidos en toneladas, sin embargo, la unidad de medida sobre los cilindros de compresión es en [MPa] o [kg/cm^2], siendo la segunda la más habitual. Por lo tanto, para conocer la resistencia se debe aplicar la fórmula 2:

Fórmula 2. Resistencia de una muestra cilíndrica

$$R = \frac{F}{A}$$

$$A = \pi r^2$$

Donde:

R es la resistencia del material a determinada carga [kg/cm²]

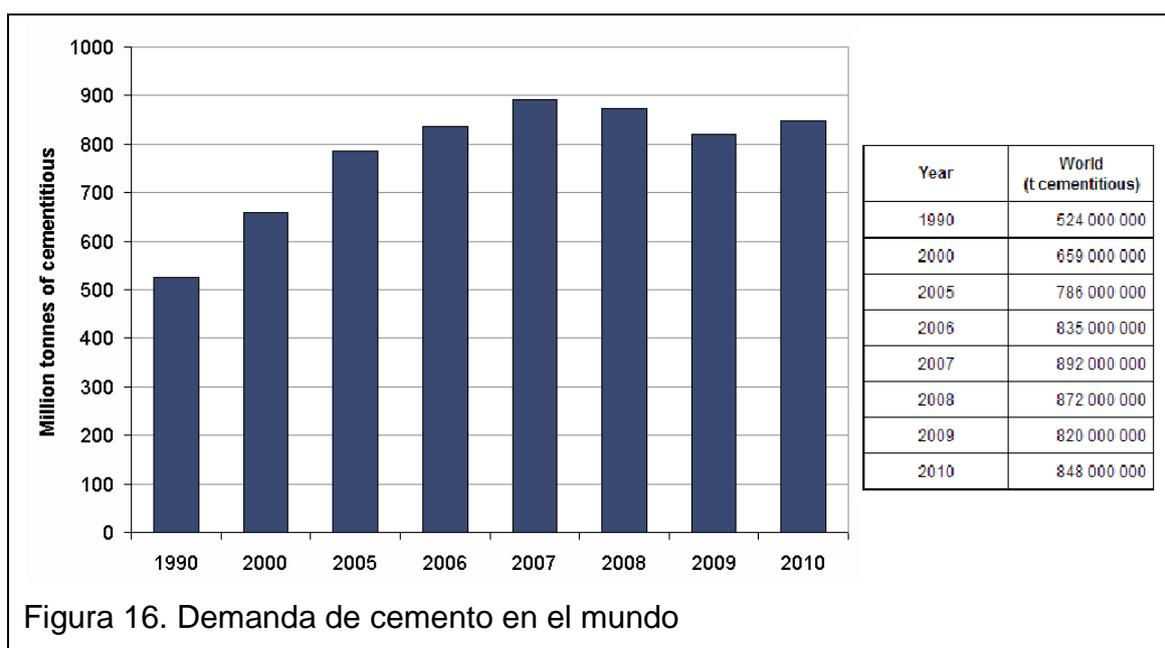
F es la carga ejercida por la compresión de la máquina [kg]

A es el área de la cara superior del cilindro [cm²]

2.8 Problemática ambiental de la industria cementera

Para entender la importancia detrás de este compuesto, debemos analizar la demanda que ha tenido a lo largo del tiempo. Al carecer de información relacionada directamente con el hormigón, se tomará información concerniente al cemento, elemento primordial para la creación de hormigón.

A nivel mundial el “World Business Council for Sustainable Development” (WBCSD) se ha encargado de analizar la demanda de cemento en su iniciativa “Cement Sustainability Initiative”. En la figura 16 podemos apreciar la dinámica que ha tenido el consumo de cemento en el mundo y por ende de hormigón.



Tomado de: World Business Council for Sustainable Development WBCSD, 2010, sección 311c.

La demanda de cemento a nivel mundial fluctúa en el tiempo, al comparar la cantidad aproximada que el mundo necesitó hacia el año 1990 con la cantidad de material que necesitó en el año 2010, se puede vislumbrar un aumento del uso del material en aproximadamente 62% (324.000.000 toneladas), denotando la importancia que ha adquirido este material a la sociedad contemporánea.

2.8.1 El CO₂ y el hormigón

Adicionalmente la WBCSD ha logrado emitir un comportamiento de la cantidad de CO₂ que implica la industria cementera, véase figura 17.

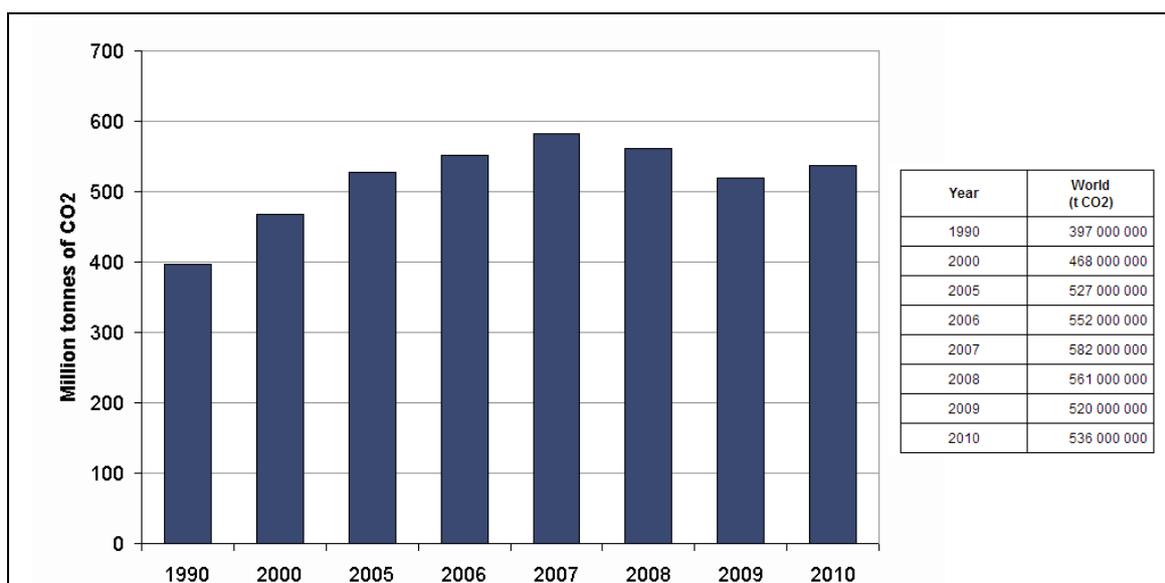


Figura 17. CO₂ causado por la actividad cementera mundial

Explicación: Las emisiones de CO₂ correspondientes a la actividad cementera mundial poseen una media aproximada de 546,33 millones de toneladas para el período comprendido entre 2005 y 2010.

Tomado de: WBCSD, 2010, sección 312b.

En el mundo contemporáneo el “Calentamiento Global” por el conocido “Efecto Invernadero” es un fenómeno que se ha ido posicionando con una relevancia cada vez mayor; se conoce que el principal causante directo en la atmósfera de estos procesos es el dióxido de carbono CO₂, principal gas de efecto invernadero.

Con el fin de poder analizar las emisiones anuales de CO₂ a nivel mundial, en la tabla 17 se condensan las emisiones de CO₂ de esta industria a lo largo de 5 años (2005 al 2010).

Tabla 17. Emisiones de CO₂ de la industria cementera

AÑO	Ton CO₂
2005	527000000
2006	552000000
2007	582000000
2008	561000000
2009	520000000
2010	536000000
Total	3278000000
Promedio	546333333

Explicación: Análisis del CO₂ emitido por la industria cementera del año 2005 al 2010.

Tomado de: WBCSD, 2010, sección 312b.

En la figura 18 podemos apreciar la situación actual de las emisiones de CO₂ totales a lo largo del tiempo.

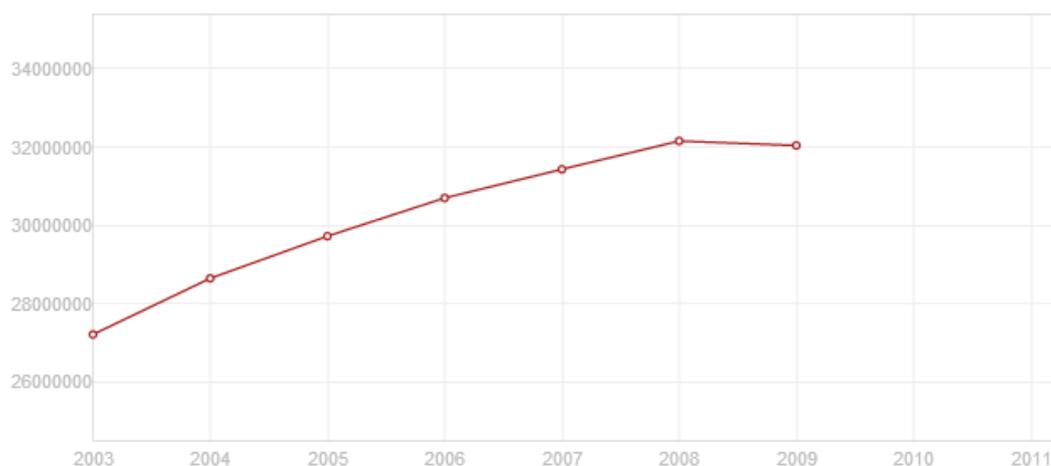


Figura 18. CO₂ total generado por la actividad humana

Explicación: Emisiones de CO₂ a nivel mundial durante los años 2003 al 2009.

Tomado de: El Banco Mundial, 2013.

Se puede evidenciar, por la tendencia del gráfico, que las emisiones a nivel mundial van en crecimiento, llegando a su máximo el año 2008 con 32.155'923.000 toneladas de CO₂, y finalmente al 2009 (última información disponible) con 32.042'246.000 toneladas de CO₂.

Para entender la problemática ambiental de la industria cementera, en la tabla 18 y figura 19 se indicará la proporción que esta industria aporta al total del CO₂ mundial; se tomará como dato la última medición de CO₂ disponible (2009) y el promedio de CO₂ que la industria cementera ha generado en el período comprendido entre 2005 y 2010.

Tabla 18. CO₂ de la industria cementera y CO₂ global

	[%]	[Ton]
CO₂ MUNDIAL	98.29	31495912667
INDUSTRIA CEMENTERA	1.71	546333333
TOTAL CO₂ 2009	100	32042246000

Explicación: CO₂ emitido por el mundo y la industria cementera en hacia el año 2009.

Adaptado de: El Banco Mundial, 2013.

WBCSD, 2010, sección 312b.

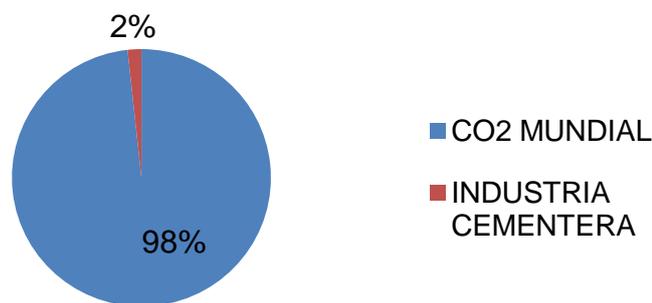


Figura 19. Proporción de CO₂ de la industria cementera en el CO₂ total

Adaptado de: El Banco Mundial, 2013.

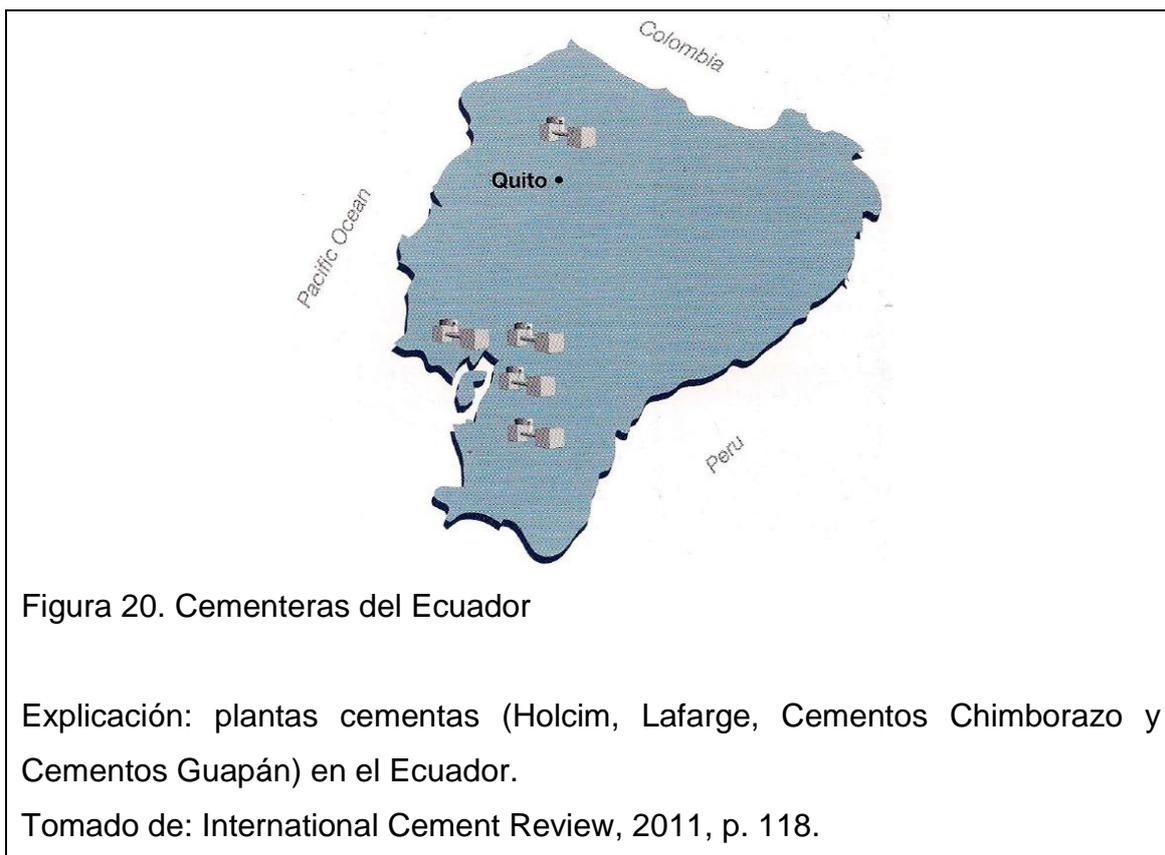
WBCSD, 2010, sección 312b.

La industria cementera ha aportado aproximadamente el 2% del total de CO₂ generado en el mundo para el año 2009.

Se estima que por cada tonelada de cemento fabricado se generan 633 Kg de CO₂. (WBCSD, 2010, sección 336)

2.8.2 La industria cementera en el Ecuador

Aunque en el Ecuador, el Instituto Ecuatoriano del Cemento y el Hormigón INECYC, ha sido el actor responsable de evaluar las cantidades totales de cemento que el país produce. “International Cement Review” nos indica un análisis, basado en los datos de INECYC, de la situación actual en nuestro país referente al cemento. En Ecuador se indica que existen 5 plantas cementeras como podemos figura 20.



De estas plantas (dos pertenecientes a Holcim) se tiene el registro de cemento producido para el año 2011 presentados en la tabla 19.

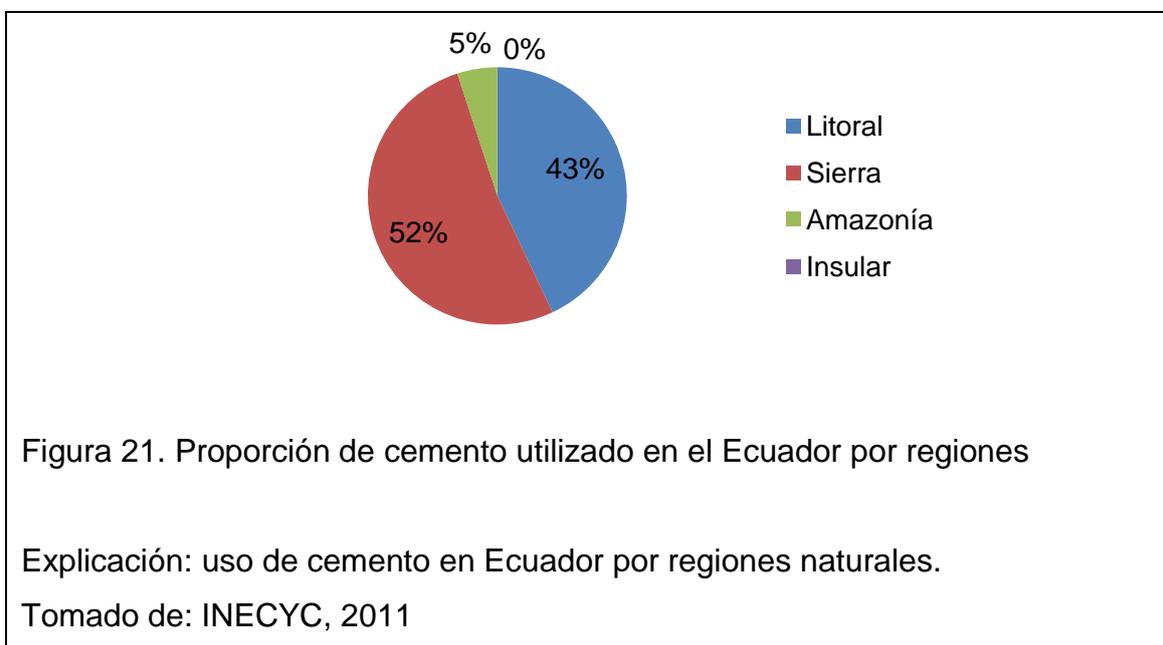
Tabla 19. Cemento producido en Ecuador

COMPAÑÍA	CAPACIDAD [Ton/año]	PLANTAS
Holcim	3500000	2
Lafarge	1600000	1
Cementos Chimborazo	800000	1
Cementos Guapán	450000	1
TOTAL	6350000	

Explicación: cantidad de cemento fabricado por plantas cementas en el Ecuador.

Tomado de: International Cement Review, 2011, p. 118.

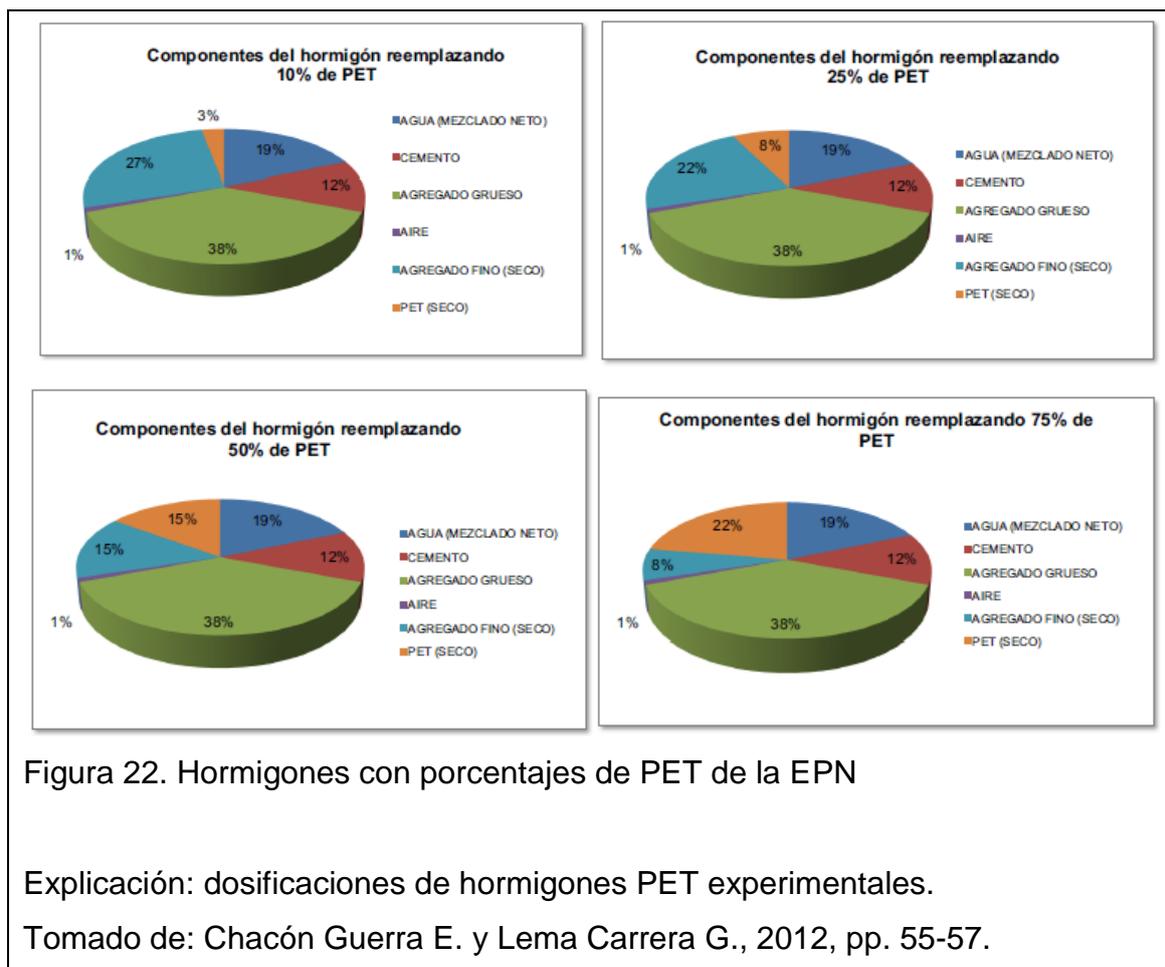
Mediante la tasa de generación de CO₂ por cada tonelada de cemento generado (633 Kg CO₂/ton cemento) se puede estimar que el País genera 4'019.550 toneladas de CO₂ por la actividad cementera.



La INECYC indica que la región sierra consume el 52 % del total de cemento que se produce anualmente, Pichincha representando el 21 % del total de cemento, es decir, Pichincha genera un aproximado de 844105,5 Toneladas de CO₂ a causa de la actividad cementera. (INECYC, 2011).

2.9 Trabajos similares al presentado

Dentro de los proyectos análogos al presente trabajo de tesis se puede mencionar con relevancia al trabajo desarrollado hacia el año 2012 en la Escuela Politécnica Nacional sobre “Estudio comparativo de elementos fabricados de hormigón con material reciclado PET (Polietileno tereftalato) y hormigón convencional”. Trabajo donde se analizan dosificaciones entre hormigones convencionales de resistencias 180 y 210 kg/cm², conjunto con PET (polietileno tereftalato); se utilizó (previo estudio granulométrico del PET) al polímero como agregado fino (arena) en diferentes dosificaciones conjunto con el agregado habitual; dosificaciones presentadas en la figura 22.



A pesar de hablar de porcentajes de reemplazo comprendidos entre 10 a 75%, no se habla del total de la fórmula del hormigón, sino, se refiere específicamente al reemplazo con el agregado fino (arena), por estos motivos y en base a los gráficos antes indicados, el reemplazo máximo de componentes del hormigón en las fórmulas estudiadas van del 3 al 22%.

Al tratarse de un trabajo de titulación referente a “Ingeniería Civil” el objetivo principal de este estudio está relacionado con las propiedades mecánicas y físicas del material en investigación. Por este motivo, en este trabajo, se han analizado un total de 11 variables a analizar (4 parámetros físicos y 7 parámetros mecánicos), las cuales podemos ver en la figura 23.



Figura 23. Propiedades estudiadas en hormigones PET de la EPN

Explicación: parámetros estudiados por el trabajo de titulación “Estudio comparativo de elementos fabricados de hormigón con material reciclado PET (Polietileno tereftalato) y hormigón convencional” de la Escuela Politécnica Nacional.

Adaptado de: Chacón Guerra E. y Lema Carrera G., 2012, pp.97-116.

Dentro de los objetivos específicos del trabajo de titulación de la facultad de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Nacional se puede mencionar: “encontrar la dosificación adecuada para hormigón PET, con características similares al hormigón convencional, para resistencias de uso común 180 y 210 kg/cm²” y “Proponer una nueva alternativa de diseño y construcción en

elementos sometidos a bajos esfuerzos, utilizando como agregado adicional material reciclado PET” (Chacón Guerra E. y Lema Carrera G., 2012, pp. 3 y 4). En los resultados obtenidos de los ensayos para los distintos parámetros o variables de estudio, podemos evidenciar que el material en búsqueda, es un material que no discrepe mayoritariamente de los hormigones convencionales utilizados en el estudio, es decir, a pesar de buscar una alternativa para el reciclaje de un desecho, que en este caso es el PET, la importancia prevalece a las características del material ya que se busca dar el mismo uso que poseen los hormigones convencionales utilizados.

Por esta razón, y en perspectiva a la tesis en curso, el trabajo de titulación desarrollado en la Escuela Politécnica Nacional no tiene como eje principal la mitigación de un problema ambiental vigente, como es el caso del problema de desechos sólidos.

Finalmente el trabajo concluye indicando que al reemplazar hasta un 25% del volumen del agregado fino (arena) con el desecho PET (hasta un 8% en la formula total), las características del material, principalmente la resistencia a la compresión, no se alteran considerablemente; y en términos generales la resistencia entre los hormigones convencionales de 180 y 210 kg/cm² disminuyen hasta en un 13% y 3% respectivamente a los 28 días de fabricación y en 9.6% y 3% a los 56 días de fabricación. (Chacón Guerra E. y Lema Carrera G., 2012, pp. 123 y 124)

Otro estudio que representa importancia para el avance de este tema de tesis fue el realizado en por la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Comunitaria Regional de Chapecó de Brasil por tema “Estudio de viabilidad de PET reciclado en concreto con respecto a su resistencia”. Al igual que en el trabajo expuesto anteriormente, este trabajo de tesis tuvo como fin reemplazar una parte de la fracción de agregado fino con un agregado sintético de PET. En los dos trabajos aquí estudiados como análogos tienden a analizar el material en estudio con una relevancia en la ingeniería civil y en segundo plano un factor ambiental; la diferencia radica en que este trabajo maneja como hormigones convencionales de mayor resistencia, de 30 MPa o 305.9 kg/cm², y

de 45 MPa o 458.86 kg/cm². En la tabla 20 podemos apreciar las dosificaciones tomadas para la experimentación de este trabajo de titulación (dosificaciones para hormigones de resistencia de 30 y 45 MPa):

Tabla 20. Dosificaciones experimentales de hormigones PET

MATERIAL	Hormigón convencional de 30 MPa	15% PET	30% PET	45% PET
Cemento	5.893	5.893	5.893	5.893
Arena	10.05	8.543	7.035	5.528
Piedra	14.716	14.716	14.716	14.716
Agua	2.537	2.537	2.537	2.537
PET	0	1.508	3.015	4.523
MATERIAL	Hormigón convencional de 45 MPa	15% PET	30% PET	45% PET
Cemento	11.436	11.436	11.436	11.436
Arena	8.984	7.636	6.289	4.941
Piedra	18.766	18.766	18.766	18.766
Agua	4.472	4.472	4.472	4.472
PET	0	1.348	2.695	4.043

Explicación: dosificaciones para hormigones PET de resistencias 30 MPa (305.9 kg/cm²) y 45 MPa (458.86 kg/cm²).

Adaptado de: Pietrobelli E., 2010, p. 38.

Como vemos en las figuras 24, 25, 26 y 27 la formulación de los diferentes materiales propuestos solo se afecta en su agregado fino, o arena.

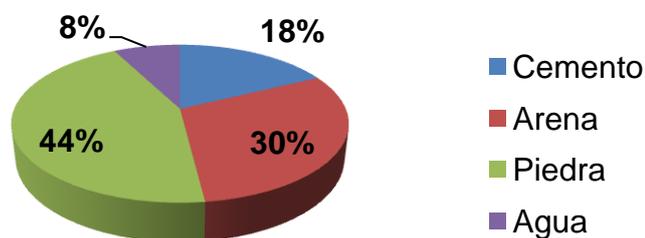


Figura 24. Formulación de hormigón convencional de 30 MPa

Adaptado de: Pietrobelli E., 2010, p. 38.

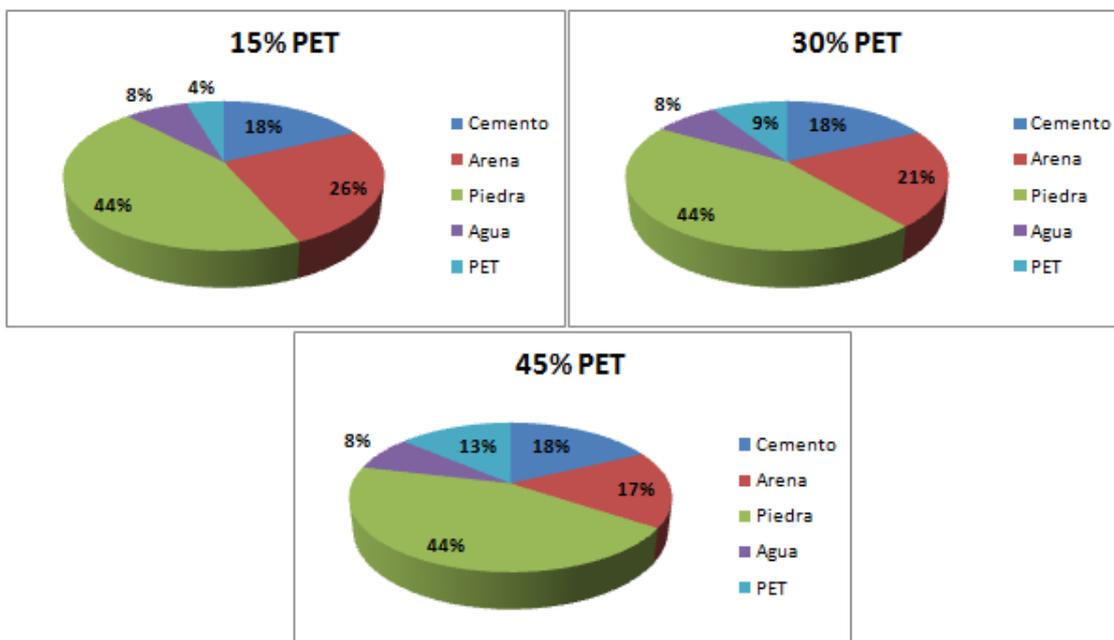


Figura 25. Formulación de hormigones PET en hormigón de 30 MPa

Adaptado de: Pietrobelli E., 2010, p. 38.

En las dos figuras previas se observa la dosificación de hormigón convencional de 30 MPa y hormigones PET experimentales.

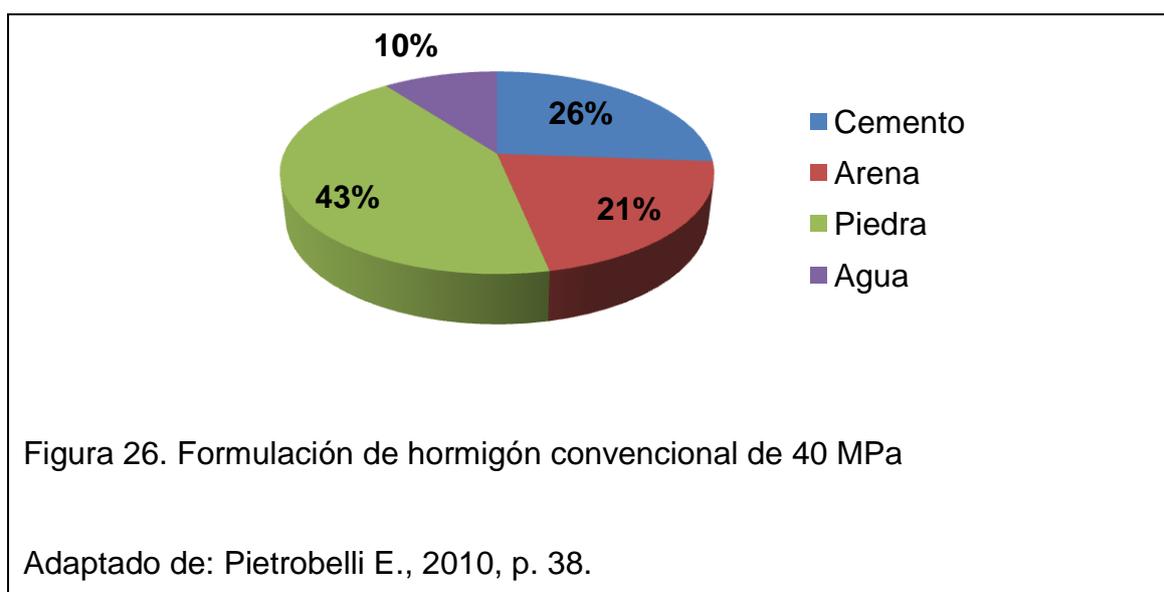


Figura 26. Formulación de hormigón convencional de 40 MPa

Adaptado de: Pietrobelli E., 2010, p. 38.

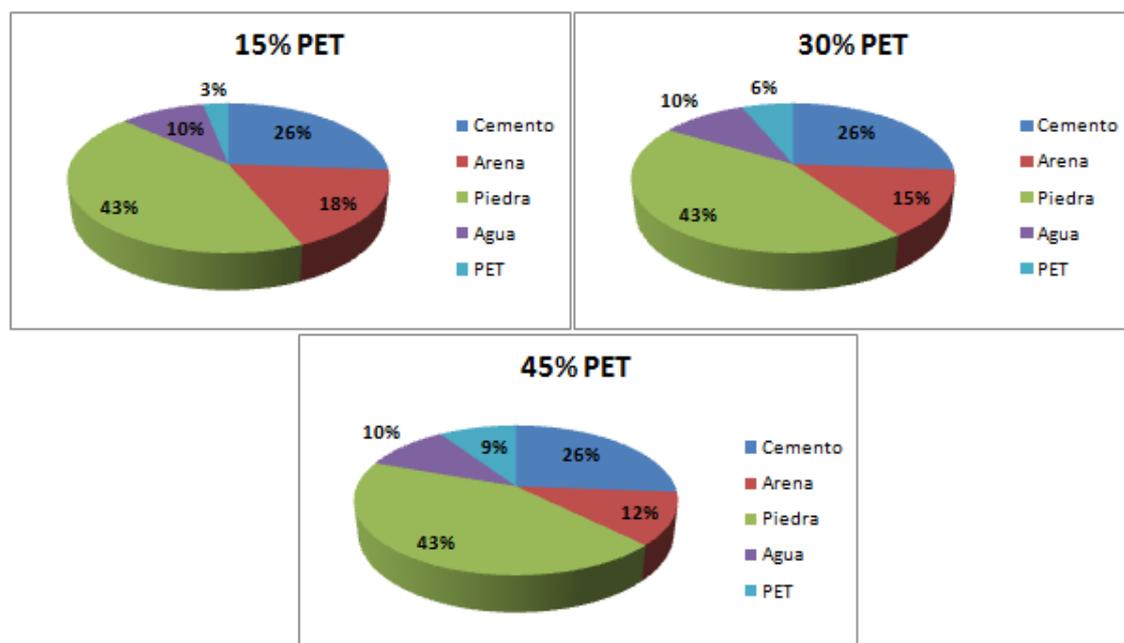


Figura 27. Formulación de hormigones PET en hormigón de 40 MPa

Adaptado de: Pietrobelli E., 2010, p. 38.

En las dos figuras previas se observa la dosificación de hormigón convencional de 40 MPa y hormigones PET experimentales.

Según los gráficos antes mostrados vemos que el máximo de reemplazo de material con PET es del 13% para hormigones de 30MPa y de 9% para hormigones de 45MPa.

Al igual que el trabajo antes mencionado (de la EPN) como en el actualmente exponiéndose, la resistencia de los materiales investigados fueron obtenidas a través de un ensayo de compresión. Los análisis se hicieron a 7, 14, 21 y 28 días de edad. Los resultados que generó este trabajo a 28 días de edad se presentan en la tabla 21.

Tabla 21. Resultados de análisis de hormigones PET

Hormigón Convencional [Mpa]	% PET	Resistencia	
		[MPa]	[kg/cm ²]
30	0	34.07	347.40
	15	17.95	183.03
	30	12.27	125.11
	45	10.41	106.15
45	0	47.21	481.39
	15	27.55	280.92
	30	24.36	248.39
	45	15.88	161.93

Explicación: Resultados de ensayos de compresión de hormigón PET experimental.

Adaptado de: Pietrobelli E., 2010, pp. 50 y 52.

En el caso de este trabajo se concluye diciendo que en hormigones 30MPa al reemplazar en un 15% la arena con PET se disminuye hasta un 47.31% de resistencia, al reemplazar un 30% se disminuye hasta un 63.99% la resistencia; y al reemplazar hasta un 45% se disminuye hasta un 69.45% la resistencia. En hormigones con resistencias convencionales de 45 MPa, al reemplazar un 15% de la arena con PET la resistencia disminuye hasta un 41.64%; al reemplazar un 30% se disminuye la resistencia hasta un 48.4% la resistencia; y al reemplazar hasta un 45% la resistencia disminuye hasta 66.36%.

2.10 Procesos o tecnologías útiles al trabajo

De las tecnologías más necesarias para el desarrollo de esta tesis es puntualmente las concernientes a la disposición del desecho para poder ser reciclado; en los gestores ambientales visitados (gestores de gran escala) que tenían la capacidad de disponer los desechos de una manera adecuada, todos ocupaban el proceso conocido como “Extrusión de Polímeros”.

La extrusión de polímeros es un proceso en el cual un polímero determinado es moldeado por una maquina llamada “extrusor” que está formado por una tolva, un tornillo sin fin una caldera o fuente de energía y una boquilla con formas

definidas. En la figura 28 podemos apreciar una máquina extrusora de polímeros.

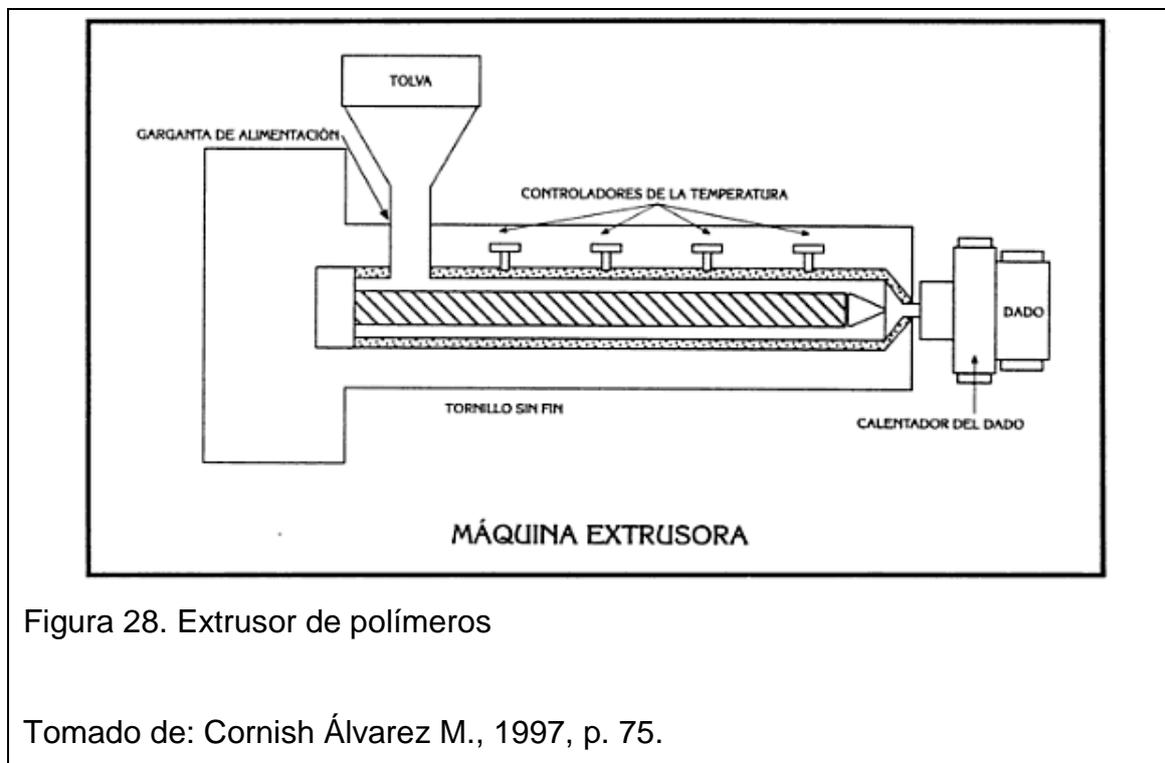


Figura 28. Extrusor de polímeros

Tomado de: Cornish Álvarez M., 1997, p. 75.

El proceso de extrusión tiene la facilidad de poder procesar una gama amplia de polímeros, entre los más utilizados tenemos: “Polipropileno PP, poliestireno PS, acrilonitrilo butadieno estireno ABS, acrílicos, poliamidas PA, policarbonato PC, polietileno, policloruro de vinilo PVC, poliéster” (Cornish Álvarez M., 1997, p. 77).

En el ámbito regional los gestores ambientales de mediana y gran escala, previamente ya caracterizado el polímero a reciclar; pelletizan el plástico para poder ser reintroducido en procesos industriales como material de reciclaje.

Otra tecnología utilizada, especialmente en el poliestireno expandido fue la trituración. Esta consiste en disminuir el tamaño de los plásticos por medio de un triturador (maquinaria que ocupa cuchillas para disminuir el tamaño de un material en especial).

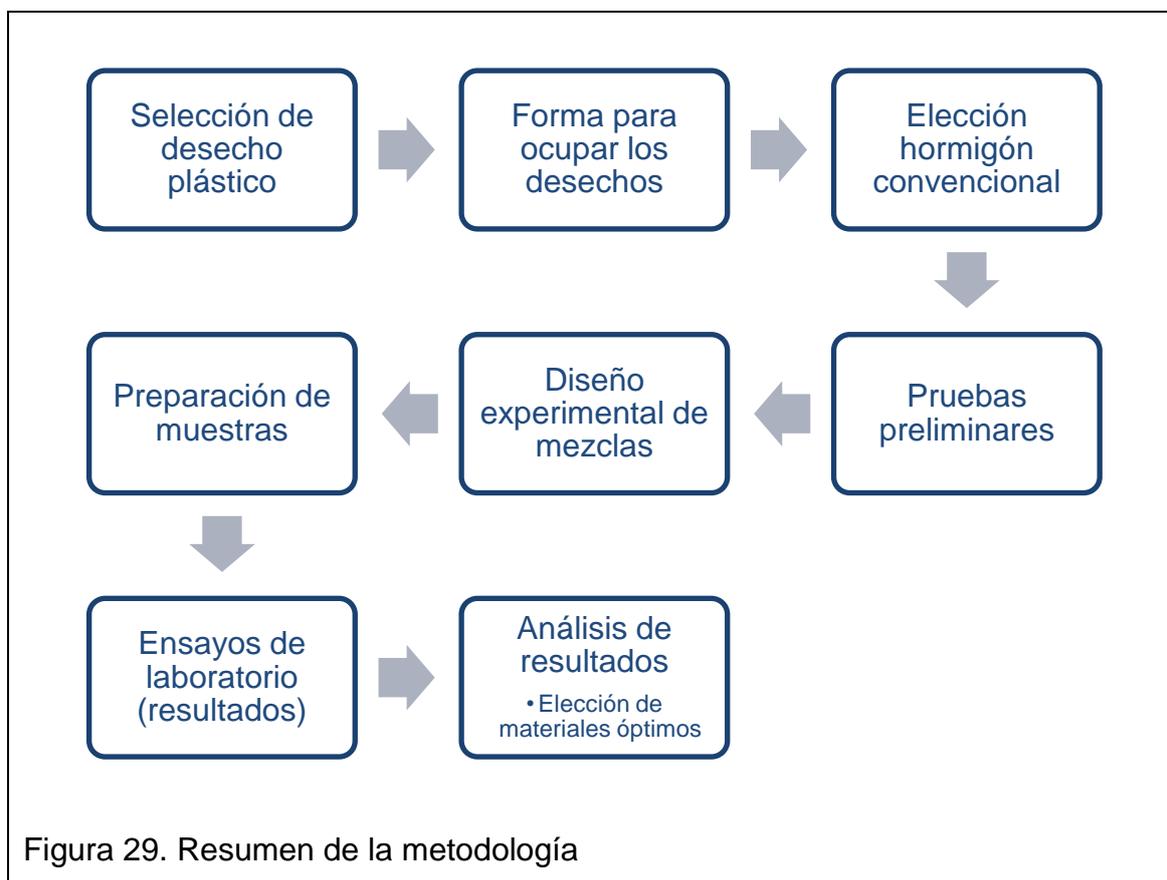
CAPÍTULO III: DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1 Metodología

El trabajo expuesto busca la creación de materiales similares al hormigón alivianado, mediante la unión de hormigón convencional conjunto con desechos plásticos en proporciones establecidas sin reemplazar un componente del hormigón puntualmente (el plástico no reemplaza ningún agregado del hormigón).

Buscando así utilizar desecho reciclable y disminuir cemento y por ende CO_2 .

En base a esta premisa la metodología del trabajo presentado sigue la siguiente lógica.



3.1.1 Criterio de selección de desechos plásticos reciclables a utilizar en la experimentación

Se conoce que los desechos reciclables en el Distrito Metropolitano de Quito, es decir plástico, papel y cartón, vidrio y metales (según la ordenanza 332 del DMQ), representan aproximadamente el 23.96% (154.405,30 toneladas) del total de desechos en períodos anuales según EMASEO. Particularmente los desechos plásticos dentro de los desechos sólidos representa el 12,45% del total de desechos y dentro de los desechos reciclables aproximadamente el 52% (80231.47 toneladas) del total como se pudo apreciar en la figura 9.

Como ya se indicó, los polímeros que conforman el desecho plástico son:

- Poliestireno expandido PS, representando 5348.76 toneladas (7%)
- Polipropileno PP, representando 10633.09 toneladas (13%)
- Polietileno de baja densidad LDPE, representando 38601.32 toneladas (48%)
- Polietileno de alta densidad HDPE, representado 13146.36 toneladas (16%)
- Polietileno tereftalato PET, representando 12501.93 toneladas (16%).

Basándose en el informe de gestores ambientales del 2011 de la Secretaría de Ambiente del DMQ con los datos antes expuestos, se estima que del total de desechos reciclables que genera la ciudad anualmente (154405.30 toneladas), se están reciclando el 76% (117090.56 toneladas). El plástico representa el 1% (1229.69 toneladas) de manera anual, es decir, que del total de desecho plástico que la ciudad genera (80231.47 toneladas) se logra reciclar un máximo del 2%.

Según el gestor ambiental de gran escala “Reciclajes M y S” el polímero con mayor cobertura de reciclaje es el polietileno de baja densidad (fundas plásticas), seguido por el polipropileno y por último el poliestireno expandido.

No se consiguió información por parte de los gestores ambientales de los otros polímeros, como el polietileno de alta densidad y el polietileno tereftalato PET.

En el caso particular del desecho PET, a partir de finales del año 2012 entró en vigencia el impuesto a botellas PET, razón por la cual el mejo de estas botellas y material se limitó a Gestores Ambientales según el Gestor Ambiental de Gran Escala “Reciclar”; es decir, la accesibilidad a este residuo fue nulo.

3.1.2 Identificación de la forma a adquirir los desechos para poder utilizarlos en la experimentación (unión de plástico con hormigón)

El Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros CIAP de la Escuela Politécnica Nacional supo indicar las posibilidades y restricciones que se tienen para dar forma a distintos plásticos, se explicó que existen algunas tecnologías utilizables, entre ellas: extrusión y trituración.

Gracias a la accesibilidad a los laboratorios del CIAP se decidió llevar una cantidad de desecho plástico de PP y LDPE, para conocer la posibilidad de dar forma a los desechos. Al hacer pruebas sobre campos magnéticos, ayudados con un imán en los desechos se detectó presencia de metales, impedimento para ocupar las operaciones de extrusión y trituración de plásticos en los laboratorios.

Se debe mencionar que en los gestores de gran escala tecnificados, se trabaja principalmente con las operaciones unitarias de trituración y extrusión de polímeros, para disponer los materiales de una manera conveniente al reciclaje. Por esta razón se decidió adquirir, directamente de los gestores ambientales tecnificados, desechos plásticos con una forma definida.

Adicionalmente se decidió mediante un proceso manual; crear tiras de polietileno de baja densidad (LDPE) con ayuda de una prensa y de un conjunto de cuchillas de una separación de 5 mm.



(a)

(b)

(a) cuchillas para cortar fundas de LDPE

(b) prensa para fundas de LDPE

Figura 30. Cuchillas y prensa de fabricación artesanal, para la creación de tiras de polietileno de baja densidad (LDPE)



(a)

(b)

(a) funda de LDPE en prensa

(b) funda hecha tiras con ayuda de las cuchillas en prensa

Figura 31. Fabricación de tiras de polietileno de baja densidad.

3.1.3 Elección de hormigón convencional en base a su resistencia

En el marco teórico se indicaron trabajos análogos al actual, es decir, proyectos de investigación de “hormigón PET”; la diferencia puntual es que dichos trabajos tuvieron una perspectiva de ingeniería civil, y por lo tanto buscan materiales que no discrepen en mayor manera a los hormigones convencionales utilizados por ellos. Como aporte a este trabajo, sus resultados han servido para dar el lineamiento del hormigón convencional a utilizar, en la tabla siguiente se presenta un resumen de esos trabajos (el desecho PET reemplaza el agregado fino).

Tabla 22. Dosificaciones de hormigón PET

Hormigón Convencional [MPa]		% PET	Resistencia	
[MPa]	[kg/cm ²]		[MPa]	[kg/cm ²]
30.00	305.9000	0	34.07	347.40
		4	17.95	183.03
		9	12.27	125.11
		13	10.41	106.15
45.00	458.8600	0	47.21	481.39
		3	27.55	280.92
		6	24.36	248.39
		9	15.88	161.93
17.65	180.0000	0	20.30	207.00
		8	17.65	180.00
20.59	210.0000	0	23.34	238.00
		8	22.65	231.00

Explicación: dosificaciones de hormigones PET experimentales.

Tomado de: Chacón Guerra E. y Lema Carrera G., 2012, p. 76.

Pietrobelli E., 2010, pp. 50 y 52.

En base a la tabla anterior se puede deducir que los hormigones convencionales de 17.65 y 20.59 MPa, es decir de 180 y 210 kg/cm² de resistencia respectivamente; tuvieron una pérdida de resistencia menor que los hormigones de 30 y 45 MPa de resistencia.

En los hormigones de 180kg/cm^2 con 8% de PET la resistencia disminuye hasta en un 13%, en hormigones de 210kg/cm^2 con 8% de PET la resistencia disminuye hasta en un 2.94%. En los otros hormigones (de 30 y 45 MPa) las resistencias disminuyen desde un 41.64% hasta un 69.44%.

Por esta razón se ha decidido utilizar como hormigón convencional uno de 210kg/cm^2 . La dosificación del hormigón aquí ocupado se describe en la tabla 23, vale indicar que la dosificación a continuación representa un metro cúbico de hormigón.

Tabla 23. Dosificación para 1 m^3 de hormigón de 210kg/cm^2

COMPONENTE	[kg]	%
Piedra $\frac{3}{4}$ (67)	895	41.47
Arena	723	33.50
Cemento	337	15.62
Agua	203	9.41

Explicación: hormigón de diseño de 210kg/cm^2 de resistencia a la compresión.

Tomado de: Disensa S.A., 2002.

En el Anexo 1 podemos apreciar la dosificación de este hormigón. Esta dosificación presentada toma como materiales los existentes en la cantera ubicada en Pifo de Holcim Ecuador S.A.



Figura 32. Cantera de Pifo de la empresa Holcim

La piedra o comúnmente conocida como ripio, es de un diámetro de $\frac{3}{4}$ de pulgada. En el Anexo 2 podemos observar las solicitudes de materiales.

3.1.3.1 Agregados y reactivos del hormigón

Los agregados necesarios para la creación del hormigón fueron los siguientes:



(a)

(b)

(a) arena de piedra triturada de diámetro máximo 4 milímetros

(b) piedra o ripio de diámetro máximo de $\frac{3}{4}$ de pulgada

Figura 33. Agregados del hormigón convencional

Los reactivos, o los materiales químicamente activos en el hormigón son:



(a)

(b)

(a) cemento, aglutinante del hormigón

(b) agua, necesaria para la reacción del hormigón

Figura 34. Reactivos del hormigón

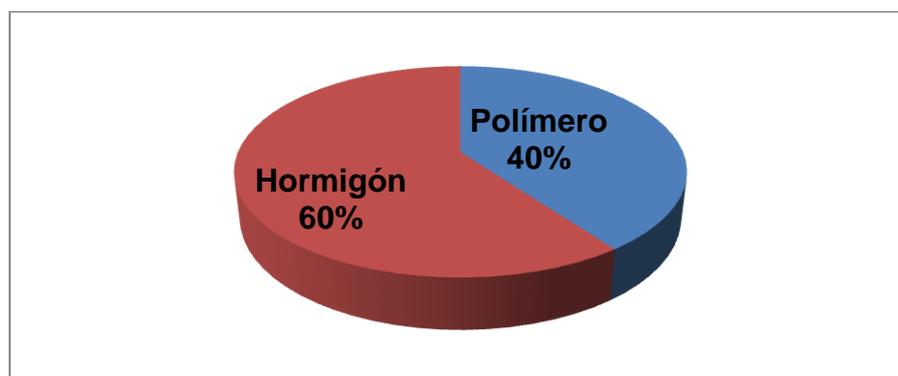
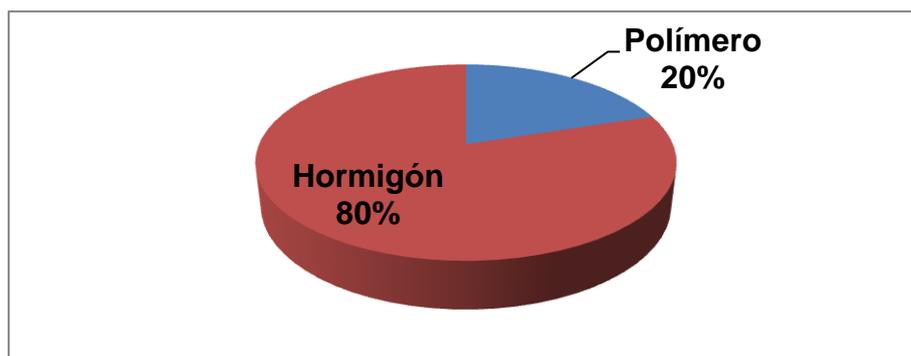
3.1.4 Diseño experimental de las muestras de materiales experimentales

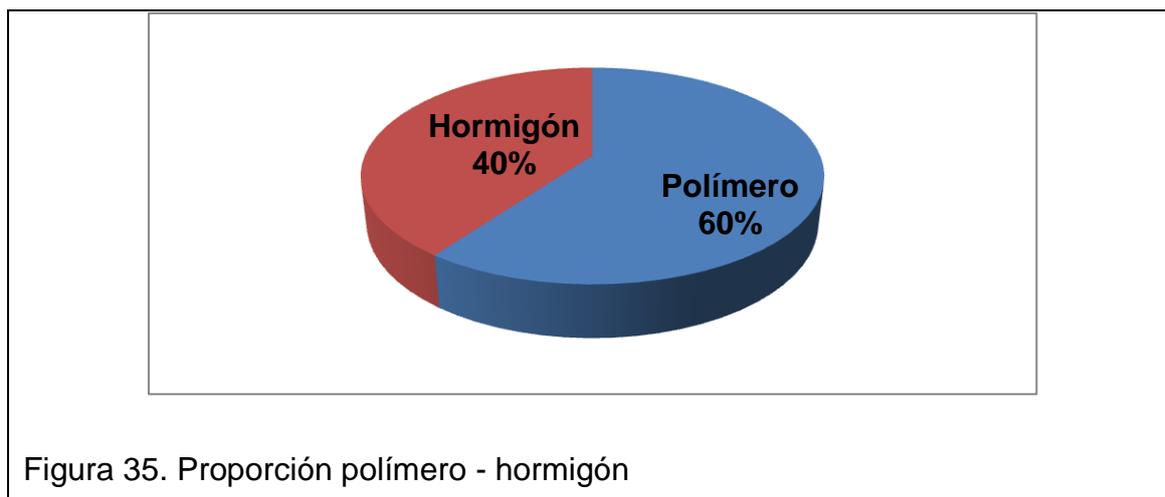
Al no existir trabajos similares al aquí desarrollándose, se decidió realizar un diseño en dos partes.

3.1.4.1 Pruebas preliminares de hormigón con desecho plástico

Se decidió experimentar en primera instancia dosis altas entre plástico y hormigón, para conocer la incidencia de los polímeros a diferentes proporciones, y así tomar una perspectiva del diseño de los materiales. En esta etapa se analizaron materiales creados entre un solo polímero y hormigón; se evaluarán los materiales a distintas edades (7 y 28 días).

Las dosificaciones son en relación volumétrica, ellas son:





3.1.4.2 Diseño de mezclas para materiales experimentales

Ya identificados los límites oportunos para la investigación, dato dictaminado por las “pruebas preliminares con desecho plástico”, se procedió a identificar el diseño experimental a utilizar.

Fue necesario utilizar un diseño experimental de mezclas, este diseño discrepa de otros, ya que en este tipo de diseño experimental la cantidad de los factores no es independiente, es decir, la cantidad de un factor indica la cantidad de los otros. Habitualmente este tipo de diseños son utilizados en farmacéutica, en la industria alimenticia y en la construcción con el diseño de materiales como el hormigón.

Para estimar que cantidades debe suplir cada factor para ocupar un total estimado, se utiliza un diagrama que representa el universo experimental basado en los factores; este diagrama indica las diferentes dosis analizables, buscando siempre cubrir el mayor espacio en el universo experimental. Para suplir el problema de buscar abarcar mayor universo experimental, se han establecido diseños que permiten entender la dinámica del universo experimental; en la figura 36 se indica el diseño conocido como “simplex lattice” uno de los más utilizados.

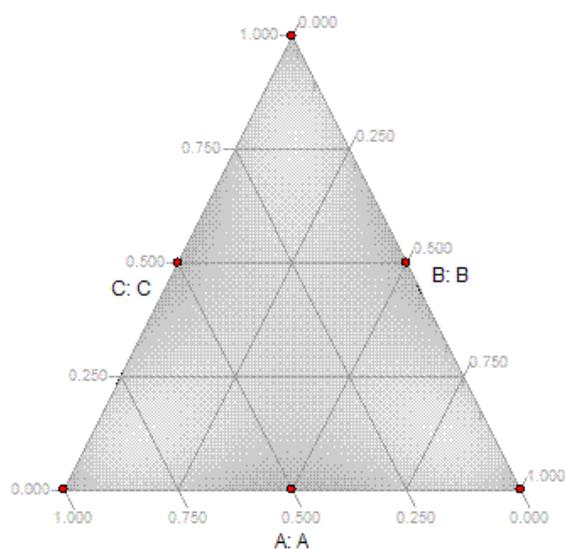


Figura 36. Diseño simplex lattice en el universo experimental

Tomado de: Design Expert, 2013, Mixture Design.

Los vértices de la figura anterior representan el 100% de cada factor, su lado opuesto representa el 0%; un punto en el perímetro significa una dosificación, en este caso los puntos rojos significan dosificaciones equilibradas, los que se encuentran en el centro de los lados indican una dosificación equilibrada entre dos factores (por ejemplo el centro del lado AB significa 50% A, 50% B y 0% C). Este diseño tiene limitaciones ya que solamente se analizan dosificaciones puras, y por lo tanto todo el universo experimental (área dentro del triángulo) no es analizado, por este motivo se ha desarrollado el diseño denominado “simplex lattice aumentado”, presentado en la figura 37, que busca abarcar mayor universo experimental y describir de mejor manera el comportamiento del experimento.

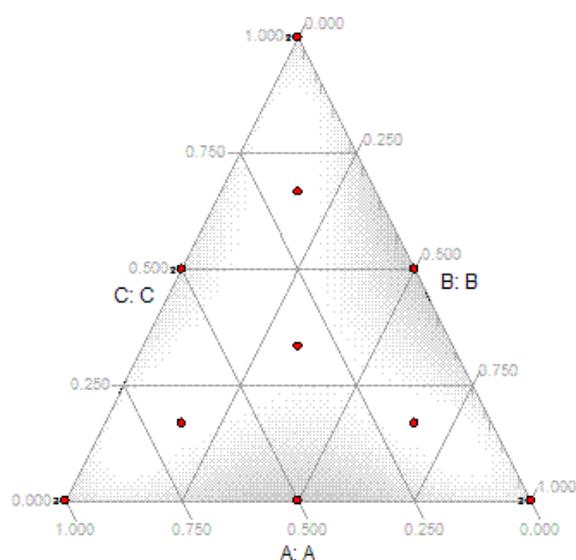


Figura 37. Diseño simplex lattice aumentado en el universo experimental

Tomado de: Design Expert, 2013, Mixture Design.

Al comparar el diseño simplex lattice con el simplex lattice aumentado, podemos apreciar que en este último las dosificaciones de las muestras han aumentado en el universo experimental, ya que no solamente vemos dosificaciones en el perímetro de la figura, sino también dentro del área de. El baricentro de la figura indica un equilibrio entre las dosificaciones de tres factores, los otros tres puntos en el universo experimental son dosificaciones donde se tiene mayor cantidad de dosis de un factor y menor cantidad de dosis de los otros dos factores (por ejemplo 2/3 de dosis para A y 1/6 de dosis tanto para B como para C). Las proporciones de los materiales estudiados se describen en la tabla 24.

Tabla 24. Dosificación de polímeros en diseño de mezclas

	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Abc	aBc	abC
PS	1.00	0.00	0.00	0.50	0.50	0.00	0.33	0.67	0.17	0.17
PP	0.00	1.00	0.00	0.50	0.00	0.50	0.33	0.17	0.67	0.17
LDPE	0.00	0.00	1.00	0.00	0.50	0.50	0.33	0.17	0.17	0.67

Como podemos ver en la tabla anterior, las fracciones de muestras (llamadas por las letras A, B y C) suman siempre la unidad. Posteriormente se indicará

cuanto representan estas fracciones en cantidades de volumen, y porque se han analizado tres formas de polímero y no cuatro como se indicó anteriormente.

Como primer paso en el diseño de mezclas es la identificación de un modelo de regresión útil para entender el comportamiento de los materiales, en relación con las variables de respuesta, y poder entender sobre el universo experimental, en qué dosificaciones se encuentran los mejores materiales según el criterio de la variable de respuesta. Los modelos estadísticos de regresión son:

Fórmula 3. Modelo de regresión lineal:

$$E(y) = \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3$$

Fórmula 4. Modelo de regresión cuadrático:

$$E(y) = \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3$$

Fórmula 5. Modelo de regresión cúbico especial:

$$E(y) = \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 + \beta_{123}x_1x_2x_3$$

Para entender que modelo estadístico se acerca más, o con menor error a los datos experimentales se ocupan los siguientes indicadores: R^2 Ajustado, desviación estándar y p-Valor; en la tabla 25 se puede apreciar la definición de los indicadores.

Tabla 25. Indicadores para modelos de regresión

INDICADOR	DEFINICIÓN	
Desviación estándar media	>1	
R^2 Ajustado	≈ 1	
p-Valor	<0.05	Significativo
	>0.05	No Significativo

Explicación: valores de los indicadores al acercarse más hacia la definición tienen menos error.

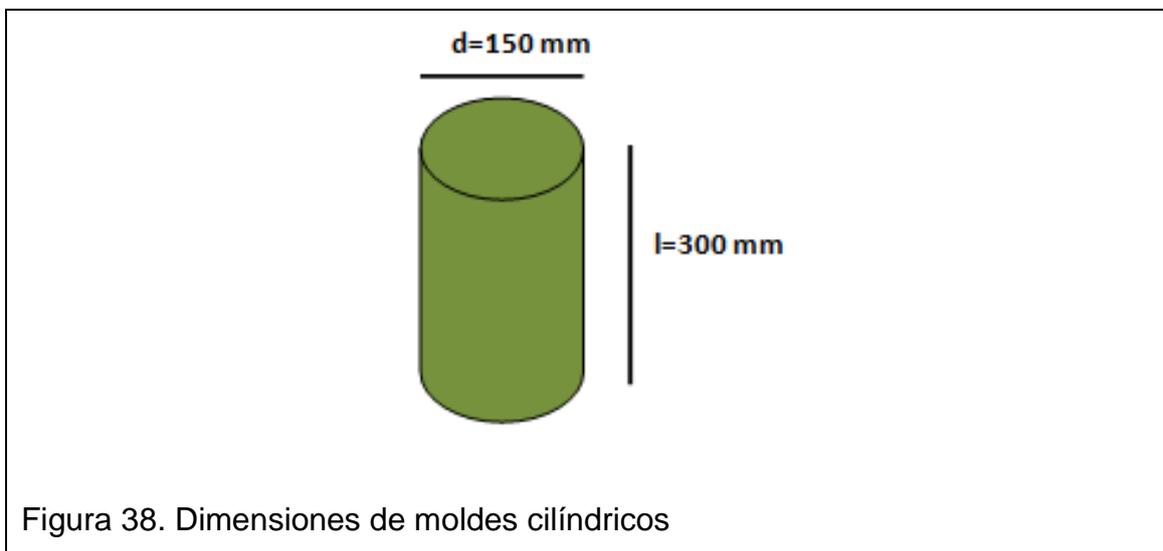
Análisis de la varianza (ANOVA) en diseño de mezclas

En el caso de que el análisis de la varianza, ANOVA, indique que los factores influyen en la variable de respuesta (se rechaza la hipótesis nula), en diseño de mezclas se utilizan dos herramientas para identificar que mezcla influye más en la variable que otra. Estas dos herramientas son:

- Coeficiente estimado: ayuda a jerarquizar que mezcla, dependiendo del modelo de regresión, es más influyente sobre la variable respuesta. En términos numéricos, este dato al ser mayor, indica mayor incidencia.
- IC 95% bajo y alto: nos ayuda a identificar el rango del coeficiente encontrado el 95% de las veces de cada factor; si el rango pasa por 0, es decir, el rango bajo es negativo y el alto es positivo, es probable que ese factor no sea significativo, ya que su coeficiente puede ser nulo o 0.

3.1.5 Determinación del tamaño de las muestras cilíndricas

En el caso particular de este trabajo se utilizaron moldes metálicos reutilizables de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto.



La formulación del hormigón convencional está basada en una parigüela, que es una medida de volumen equivalente a un metro cúbico; por esta razón es necesario conocer el volumen de los moldes cilíndricos para estimar la

formulación del hormigón para cada muestra. Para identificar el volumen por muestra se utilizará la fórmula 6.

Fórmula 6. Volumen de moldes cilíndricos

$$V = \frac{\pi * d^2}{4} * l$$

De donde:

V es volumen [cm³]

d es diámetro [cm]

l es longitud [cm]

3.1.6 Preparación de muestras de hormigón convencional y materiales experimentales

A continuación se describen los pasos que se tomaron para la creación de las muestras de materiales. Los pasos fueron:

- Preparación de muestras de hormigón convencional
- Preparación de muestras de pruebas preliminares de hormigón con desecho plástico
- Preparación de muestras para materiales experimentales

3.1.6.1 Preparación de muestras de hormigón convencional

El proceso consiste en mezclar los agregados que conforman el hormigón y finalmente el agua para homogenizar y encofrar el material en el molde cilíndrico.



(a)

(b)

(a) mezcla de agregados y cemento

(b) adición de agua y homogenización

Figura 39. Creación de muestra de hormigón convencional 210

Se procede a encofrar la muestra y pasadas 24 horas se desencofran; se hicieron dos muestras de hormigón convencional, para ser analizadas a los 7 y 28 días de vida.

3.1.6.2 Preparación de muestras de pruebas preliminares de hormigón con desecho plástico

Se tomó el polímero a ser experimentado, en la cantidad necesaria gracias a una probeta de un litro de capacidad.

Una vez ya medidas las cantidades necesarias de polímero se procede a mezclarlas con los agregados (arena y ripio) y cemento.



(a) PP pelletizado con arena y ripio

(b) adición de cemento

(c) homogenización

Figura 40. Mezcla de polipropileno pelletizado (PP)



(a) LDPE en tiras con arena, ripio y cemento

(b) homogenización

Figura 41. Mezcla de polietileno de baja densidad en tiras (LDPE)



(a) LDPE pelletizado con arena y ripio

(b) adición de cemento

(c) homogenización

Figura 42. Mezcla de polietileno de baja densidad pelletizado (LDPE)



(a) PS triturado con arena, ripio y cemento

(b) homogenización

Figura 43. Poliestireno expandido triturado (PS) con agregados y homogenización con cemento

Finalmente se añadió agua, se homogenizó y se encofró durante 24 horas.



(a)

(b)



(c)

(d)

- (a) hormigón más PP pelletizado
- (b) hormigón más LDPE en tiras
- (c) hormigón más LDPE pelletizado
- (d) hormigón más PS triturado

Figura 44. Material de polipropileno pelletizado (PP) y polietileno de baja densidad en tiras (LDPE) con hormigón

Cada material de las pruebas preliminares tuvo dos repeticiones, una analizada a los 7 días de vida y otra a los 28 días de vida.

3.1.6.3 Preparación de muestras de materiales experimentales

Mediante el diseño de mezclas se procedió a mezclar los distintos polímeros para conocer su posible efecto en el material. Se unió esta mezcla de polímeros con los agregados del hormigón y se añadió agua homogenizando.

Esta experimentación prescindió del LDPE en tiras, ya que como se verá posteriormente, sus resultados en las pruebas preliminares fueron bajos.



(a)

(b)

(c)

(a) mezcla de polímeros (PS, LDPE y PP)

(b) mezclado de polímeros más agregados y cemento

(c) homogenización junto con agua

Figura 45. Mezcla entre poliestireno expandido triturado (PS), polipropileno pelletizado (PP) y polietileno de baja densidad pelletizado (LDPE), conjunto con hormigón 210

Se procedió a encofrar las muestras y desencofrarlas 24 horas después. Se sometieron a fraguado por 7 días. Todas las muestras de la segunda experimentación tuvieron 28 días de vida (se tuvieron dos repeticiones de cada muestra).

3.1.7 Identificación del material óptimo post experimentación

Una vez que ya se hayan analizado las muestras, para elegir el material que entregue mejores características, desde un punto de vista ambiental y técnico estructural, se decidió ponderar los resultados de cada material de la siguiente manera.

Tabla 28. Ponderación de las variables de respuesta

VARIABLE DE RESPUESTA (V_i)	PESO (P_i)
Desecho reciclado	0.4
CO ₂ evitado	0.3
Resistencia	0.2
Densidad	0.1
TOTAL	1.0

Explicación: peso de las variables de respuesta para encontrar materiales con mejores resultados (con énfasis en las variables ambientales).

Como se pudo apreciar, la mayor importancia en la ponderación se lleva la variable de respuesta “Desecho reciclado” con 0.4, la razón es que el trabajo aquí expuesto busca como principal fin el reciclaje de desechos; seguido tenemos a la variable de respuesta “CO₂ evitado” con 0.3, se ha dado esta ponderación ya que el trabajo pone principal énfasis en la mitigación ambiental; posteriormente se encuentra la variable de respuesta “Resistencia” con 0.2, obtuvo esta importancia ya que dentro de los límites teóricos de los hormigones ligeros todas las densidades de los materiales analizados cumplen, por lo tanto se buscó dar énfasis a la variable resistencia (variables técnicas estructurales); finalmente tenemos a la variable densidad con 0.1.

Adicionalmente, para eliminar el error que puede generarse por la dimensión de las variables (una variable puede ser superior a otra por su naturaleza, es decir, una variable puede tener como respuesta valores de volumen y otra como respuesta valores de masa, haciéndolas no comparables), se ocupará la desviación estándar de las variables de respuesta para encontrar factores adimensionales que puedan ser ponderados.

Las siguientes fórmulas describen la importancia del material.

Fórmula 7. Índice de importancia de materiales

$$M = \sum_{i=1}^n CV_i * P_i$$

$$M = CV_1P_1 + CV_2P_2 + CV_3P_3 + CV_4P_4 + \dots + CV_nP_n$$

Fórmula 8. Coeficiente de variación para ponderar variables de respuesta

$$CV_i = \frac{R_i}{DS}$$

De donde:

M: valor del material

Pi: peso de la variable de respuesta

CVi: coeficiente de variación de cada variable de respuesta por material (factor adimensional)

Ri: variable de respuesta: desecho reciclado [kg], CO₂ evitado [kg], resistencia [kg/cm²] ó densidad [gr/cm³]

DS: desviación estándar de las variables de respuesta desecho reciclado [kg], CO₂ evitado [kg], resistencia [kg/cm²] ó densidad [gr/cm³]

El valor M de mayor resultado es el material con mayor importancia.

3.2 Procesos obligatorios en la preparación de muestras de materiales investigados

La preparación de cada muestra cilíndrica, necesarias para la valoración de las variables de respuesta densidad y resistencia a la compresión, tienen procesos específicos para su creación, ellos son:

- Preparación de moldes cilíndricos
- Proceso de encofrado
- Proceso de fraguado

3.2.1 Preparación de moldes cilíndricos

Un paso obligatorio para la fabricación de muestras es la preparación de los moldes cilíndricos para colocar el material a analizar.

La norma NTE INEN 0198 indica lo siguiente:

Limpieza del interior de los moldes cilíndricos y su base, hasta retirar cualquier impureza de un uso anterior.



(a)

(b)

(a) limpieza del interior de molde cilíndrico con un cepillo metálico

(b) interior de molde cilíndrico limpio de impurezas

Figura 46. Limpieza de moldes cilíndricos



(a)

(b)

(a) limpieza de base de molde cilíndrico con cepillo metálico

(b) base de molde cilíndrico limpia de impurezas

Figura 47. Limpieza de bases de moldes cilíndricos

Propagar una ligera capa de aceite vegetal por las paredes interiores del molde y su base.



Figura 48. Expansión de una capa de diesel sobre la pared interna de los moldes cilíndricos y base

3.2.2 Proceso de encofrado

El procedimiento de encofrado describe como se debe colocar un hormigón o material análogo en moldes cilíndricos para crear muestras a ser analizadas en ensayos de compresión. Para esto se debe tomar en cuenta el diámetro del molde cilíndrico, ya que en base a esto colocaremos el material en un número de capas establecidas, y en cada capa se deberá apisonar o compactar con

una varilla metálica en especial (el molde debe colocarse en una superficie plana). Como vemos en la tabla 26.

Tabla 26. Compactación para moldes cilíndricos

DIÁMETRO DE CILINDROS [pul] y [mm]	MODO DE COMPACTACIÓN	NÚMERO DE CAPAS DE HORMIGÓN
[3 ó 4] [75 a 100]	Varillado	2
[6] [150]	Varillado	3
[9] [225]	Varillado	4
hasta [9] [225]	Varillado	2

Explicación: número de capas requeridas para los moldes cilíndricos para muestras de hormigón.

Adaptado de: Comisión Guatemalteca de Normas COGUANOR, 2007, p. 17.

El número de compactaciones o golpes con la varilla sigue la siguiente lógica.

Tabla 27. Relación diámetro de cilindro y diámetro de varilla

DIÁMETRO DE CILINDROS [pul] y [mm]	DIÁMETRO DE VARILLA [pul] y [mm]	NÚMERO DE GOLPES POR CAPAS CAPAS
[3] [75] a [6] [150]	[3/8] [10]	25
[6] [150]	[5/8] [16]	25
[8] [200]	[5/8] [16]	50
[10] [250]	[5/8] [16]	75

Explicación: diámetro de varilla y número de golpes/capa a ser usados en el moldeado de moldes cilíndricos.

Adaptado de: Comisión Guatemalteca de Normas COGUANOR, 2007, p. 19

Ya colocadas correctamente el material en el molde se debe aplanar su superficie con ayuda de una paleta de albañil o bailejo. “Posteriormente se debe cubrir los moldes cilíndricos y dejarlos reposar de 24 a 32 horas sin que sufran movimientos”. (COGUANOR, 2007. p. 20). Pasado el tiempo indicado se procede a desencofrar la muestra cilíndrica. En el caso particular de este trabajo, los moldes cilíndricos, al tener un diámetro de 150 mm, para el encofrado el material se ubicó en tres espacios, y se compactó con una varilla de 16 mm de diámetro con 25 golpes por capa.



Figura 49. Muestra de hormigón encofrada y desencofrada 7 días después

3.2.3 Proceso de fraguado

Es un proceso posterior al desencofrado, donde se vierten las muestras en un medio saturado de agua; donde, durante 7 días, el material va a adquirir una resistencia comprendida entre 65 a 75% de su resistencia total, concebida a los 28 días de vida.



Figura 50. Muestras de hormigón fraguando

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1 Desechos plásticos seleccionados para la experimentación

Basándose en el apartado 3.1.1, los desechos seleccionados son los siguientes:

- Poliestireno expandido (PS) o espuma flex



Figura 51. Desecho de poliestireno expandido

- Polietileno de baja densidad (LDPE): ocupado en recipientes con fines alimenticios y no, y bolsas.



Figura 52. Desechos de polietileno de baja densidad

- Polipropileno (PP): ocupado en recipientes con fines y no alimenticios, bolsas plásticas, juguetes, capuchones para flores.



Figura 53. Desecho de polipropileno

4.2 Forma en las que se ocuparon los desechos en la experimentación

De manera concluyente al apartado 3.1.2, a los tres desechos plásticos seleccionados se optó ocuparlos con la siguiente forma:

PS: triturado

LDPE: pelletizado y en tiras

PP: pelletizado



(a)



(b)



(c)

(d)

- (a) poliestireno expandido triturado (PS)
- (b) polietileno de baja densidad extruido pelletizado (LDPE)
- (c) polietileno de baja densidad dispuesto en forma de tiras (LDPE)
- (d) polipropileno extruido pelletizado (PP)

Figura 54. Forma de distintos polímeros para la experimentación

4.3 Muestras cilíndricas de materiales de pruebas preliminares de hormigón con desechos plásticos y materiales experimentales, para analizar en laboratorio

Todas las muestras presentadas fueron creadas en moldes cilíndricos de 15 cm de diámetro y 30 cm de longitud. Los materiales fueron compactados en el molde con 25 golpes de una varilla de $\frac{3}{8}$ de pulgada en cada tercio del molde. Fueron desencofradas 24 horas después, vertidas en agua durante 7 días para el fraguado y analizadas a los 28 días de edad. Se prepararon 22 muestras para materiales de pruebas preliminares y 60 muestras para materiales experimentales.



(a)

(b)



(c)

(d)

- (a) muestra de PP pelletizado desencofrado
- (b) muestra de LDPE en tiras desencofrado
- (c) muestra de LDPE pelletizado desencofrado
- (d) muestra de PS triturado desencofrado

Figura 55. Muestras de materiales de pruebas preliminares



Figura 56. Algunas muestras de materiales experimentales e 28 días de vida

4.4 Cálculo de la muestra

Como se pudo apreciar anteriormente, el diseño del hormigón está basado en un volumen de un metro cúbico. Se conoce que el diámetro del molde cilíndrico es de 15 cm, y su longitud es 30 cm; al reemplazar estos datos en la fórmula 6, se obtiene el siguiente volumen, correspondiente al de una muestra.

$$V = \frac{\pi * d^2}{4} * l = 5301437,6 \text{ mm}^3 = 5301,44 \text{ cm}^3 = 0,005301 \text{ m}^3$$

En base a este volumen se han identificado de manera puntual las dosificaciones para las muestras de hormigón convencional, las muestras para las pruebas preliminares de hormigón con desecho plástico y para las muestras de materiales experimentales.

4.1.1 Dosificación para muestras de hormigón convencional

El hormigón convencional de 210 kg/cm² de resistencia, en base al volumen del molde cilindro, tiene como dosificación las siguientes proporciones de agregado fino (arena), agregado grueso (ripio), cemento y agua.

Tabla 29. Dosificación para hormigón 210

COMPONENTE	[kg]	%
Piedra ¾ (67)	4.7	41.47
Arena	3.8	33.50
Cemento	1.8	15.62
Agua	1.1	9.41

Explicación: dosis de hormigón convencional equivalente a una muestra cilíndrica.

Adaptado de: Disensa S.A., 2002.

4.1.2 Dosificaciones para pruebas preliminares de hormigón con desecho plástico

Las pruebas preliminares de hormigón con desecho plástico tuvieron como fin analizar la relación entre el hormigón y un solo polímero a grandes proporciones (en este caso no se mezclan los polímeros), ya que no existen investigaciones análogas anteriores. Al no disponer de una balanza de precisión, o sensible para medir la cantidad de polímero; se concluyó dosificando entre el hormigón y los desechos en relaciones de volumen, llegando a evaluar el hormigón con el polímero en las siguientes proporciones:

Tabla 30. Hormigón 80% y polímero 20%

	COMPONENTE	[Kg]	[cm3]	%
HORMIGÓN	Piedra ¾ (67)	3.80	4241.15	80
	Arena	3.07		
	Cemento	1.43		
	Agua	0.86		
	POLÍMERO	---	1060.29	20

Tabla 31. Hormigón 60% y polímero 40%

	COMPONENTE	[Kg]	[cm3]	%
HORMIGÓN	Piedra ¾ (67)	2.85	3180.86	60
	Arena	2.30		
	Cemento	1.07		
	Agua	0.65		
	POLÍMERO	---	2120.58	40

Tabla 32. Hormigón 40% y polímero 60%

	COMPONENTE	[Kg]	[cm3]	%
HORMIGÓN	Piedra ¾ (67)	1.90	2120.58	40
	Arena	1.53		
	Cemento	0.71		
	Agua	0.43		
	POLÍMERO	---	3180.86	60

Se analizaron dos muestras de cada dosificación, están basadas en el volumen de un molde cilíndrico. Una de ellas fue ensayada a los 7 días de vida y la otra a los 28 días de vida; la razón de esto fue para conocer el comportamiento del material (se estima que a los 7 días de fraguado la resistencia tiende del 65 al 75%, y a los 28 días de vida la resistencia tiende a ser del 100%). Por lo tanto en total se estimaron 24 muestras a ser analizadas.

4.1.3 Dosificaciones para muestras de materiales experimentales

En base a los resultados de las pruebas preliminares de materiales de hormigón con desecho plástico; se decidió eliminar el LDPE en tiras, dada la ineficiencia del material fabricado con ello. También se decidió eliminar las dosificaciones de polímero con hormigón mayores a 40% polímero, por esta razón se investigarán materiales con 20, 30 y 40%. En las tablas 33, 34 y 35 vemos las proporciones de hormigón y polímero en relación volumétrica de acuerdo al volumen de los moldes cilíndricos.

Tabla 33. Dosificación con 20% de polímero

	COMPONENTE	[Kg]	[cm3]	%
HORMIGÓN	Piedra ¾ (67)	3.80	4241.15	80
	Arena	3.07		
	Cemento	1.43		
	Agua	0.86		
	POLÍMERO	---	1060.29	20

Tabla 34. Dosificación con 30% de polímero

	COMPONENTE	[Kg]	[cm3]	%
HORMIGÓN	Piedra $\frac{3}{4}$ (67)	3.32	3711.01	70
	Arena	2.68		
	Cemento	1.25		
	Agua	0.75		
	POLÍMERO	---	1590.43	30

Tabla 35. Dosificación con 40% de polímero

	COMPONENTE	[Kg]	[cm3]	%
HORMIGÓN	Piedra $\frac{3}{4}$ (67)	2.85	3180.86	60
	Arena	2.30		
	Cemento	1.07		
	Agua	0.65		
	POLÍMERO	---	2120.58	40

Los materiales experimentales analizan los efectos de la unión de varios polímeros en una mezcla, por esta razón se utiliza el diseño de mezclas "simplex lattice aumentado". En base a esto las dosificaciones de las mezclas de los polímeros PS, PP y LDPE se presentan en la tabla 36 (cada muestra tuvo dos repeticiones para conocer de mejor manera su comportamiento).

Tabla 36. Dosificaciones para mezclas experimentales

Material	#	%	UNITARIO			[cm ³]		
			PS	PP	LDPE	PS	PP	LDPE
A	1	20%	1.00	0.00	0.00	1060.29	0.00	0.00
B	2		0.00	1.00	0.00	0.00	1060.29	0.00
C	3		0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1060.29
AB	4		0.50	0.50	0.00	530.14	530.14	0.00
AC	5		0.50	0.00	0.50	530.14	0.00	530.14
BC	6		0.00	0.50	0.50	0.00	530.14	530.14
ABC	7		0.33	0.33	0.33	353.43	353.43	353.43
Abc	22		0.67	0.17	0.17	706.86	176.71	176.71
aBc	23		0.17	0.67	0.17	176.71	706.86	176.71
abC	24		0.17	0.17	0.67	176.71	176.71	706.86
A	8	30%	1.00	0.00	0.00	1590.43	0.00	0.00
B	9		0.00	1.00	0.00	0.00	1590.43	0.00
C	10		0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1590.43
AB	11		0.50	0.50	0.00	795.22	795.22	0.00
AC	12		0.50	0.00	0.50	795.22	0.00	795.22
BC	13		0.00	0.50	0.50	0.00	795.22	795.22
ABC	14		0.33	0.33	0.33	530.14	530.14	530.14
Abc	25		0.67	0.17	0.17	1060.29	265.07	265.07
aBc	26		0.17	0.67	0.17	265.07	1060.29	265.07
abC	27		0.17	0.17	0.67	265.07	265.07	1060.29
A	15	40%	1.00	0.00	0.00	2120.58	0.00	0.00
B	16		0.00	1.00	0.00	0.00	2120.58	0.00
C	17		0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	2120.58
AB	18		0.50	0.50	0.00	1060.29	1060.29	0.00
AC	19		0.50	0.00	0.50	1060.29	0.00	1060.29
BC	20		0.00	0.50	0.50	0.00	1060.29	1060.29
ABC	21		0.33	0.33	0.33	706.86	706.86	706.86
Abc	28		0.67	0.17	0.17	1413.72	353.43	353.43
aBc	29		0.17	0.67	0.17	353.43	1413.72	353.43
abC	30		0.17	0.17	0.67	353.43	353.43	1413.72

En total se hicieron 62 muestras que fueron analizadas a los 28 días de edad (edad en que los materiales tienden al 100% de su resistencia).

4.2 Resultados de los ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio fueron realizados en las instalaciones del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Análisis de Materiales e la Escuela Politécnica Nacional. Los resultados del análisis pueden observare en el Anexo 3 y 4.

Se obtuvieron dos variables de respuesta: densidad y resistencia a la compresión.

La densidad fue obtenida gracias a una balanza de precisión y la resistencia a la compresión fue obtenida gracias a una máquina de compresión.



Figura 57. Balanza de precisión del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Análisis de Materiales de la Escuela Politécnica Nacional.



Figura 58. Máquina de compresión del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Análisis de Materiales de la Escuela Politécnica Nacional.

4.2.1 Resultados de pruebas preliminares

Se presenta de manera separada los resultados obtenidos, tanto de la variable “resistencia”, como de la variable “densidad”. Se tienen dos lecturas de cada muestra, que representan los valores concernientes a 7 y 28 días de vida (factor que influye en la resistencia del material).



(a)

(b)



(c)



(d)

- (a) ensayo sobre material de PP
- (b) ensayo sobre material de LDPE en tiras
- (c) ensayo sobre material de LDPE pelletizado
- (d) ensayo sobre materiales con PS triturado

Figura 59. Ensayo de compresión sobre materiales de pruebas preliminares en laboratorios de la EPN

Tabla 37. Resistencia a la compresión de materiales de pruebas preliminares medurado en kg/cm² (de 7 y 28 días de vida)

NIVELES	FACTORES	POLIPROPILENO PELLET		POLIETILENO TIRAS		POLIETILENO PELLET		POLIESTIRENO EXPANDIDO TRITURADO	
		20%	86	114	6	10	108	120	80
40%	47	50	---	---	24	37	9	14	
60%	10	13	---	---	15	13	1	2	

	7 DIAS
	28 DIAS

Como podemos apreciar en la tabla 37, el factor “Polietileno en tiras” solo tuvo un análisis, la razón fue que en su primer ensayo los resultados fueron demasiado bajos, motivo por el que se decidió no analizar en otros niveles.

Tabla 38. Densidad de materiales de pruebas preliminares medurado en gr/cm³

NIVELES	FACTORES	POLIPROPILENO PELLET		POLIETILENO TIRAS		POLIETILENO PELLET		POLIESTIRENO EXPANDIDO TRITURADO	
		20%	2.02	2.04	1.65	1.67	2.01	1.97	1.89
		2.03		1.66		1.99		1.925	
40%	1.83	1.81	---	---	1.64	1.69	1.54	1.58	
		1.82		---		1.665		1.56	
60%	1.4	1.37	---	---	1.33	1.35	0.97	1.06	
		1.385		---		1.34		1.015	

	7 DIAS
	28 DIAS
	MEDIA

En el caso de la densidad, los dos resultados pueden ser analizados en conjunto, es decir, de ellos se puede sacar una media que puede indicar el comportamiento general del material.

4.2.2 Resultados de muestras de materiales experimentales



Figura 60. Ensayos de compresión sobre muestras de materiales experimentales en los laboratorios de la EPN

Se hicieron dos repeticiones de cada material, para conocer de mejor manera su comportamiento.

La primera columna, en las tablas 39, 40 y 41, representa el número de muestra que el laboratorio asignó a cada material; existe un desfase del número de muestra en las tres tablas en los materiales “Abc, aBc y abC”, la razón fue que estos materiales se analizaron al final.

A continuación se presentan los resultados, tanto de la densidad como de la resistencia, en tres tablas de materiales que contienen: 20% de polímero, 30% de polímero y 40% de polímero.

Tabla 39. Resultados de mezcla con 20% de polímero

	Material	%	MUESTRAS			DENSIDAD [gr/cm ³]		RESISTENCIA [Kg/cm ²]	
			PS	PP	PELD	1	2	1	2
1	A	20%	1	0	0	1.89	1.89	61.00	55.00
2	B		0	1	0	1.90	1.87	48.00	56.00
3	C		0	0	1	2.02	2.00	52.00	58.00
4	AB		0.5	0.5	0	1.96	1.93	56.00	61.00
5	AC		0.5	0	0.5	2.00	2.02	65.00	66.00
6	BC		1.89	1.87	67.00	65.00			
			1.94	1.92	57.00	57.00			
7	ABC		0.33	0.33	0.33	1.95	1.97	79.00	81.00
22	Abc		0.67	0.17	0.17	1.97	1.94	66.00	61.00
23	aBc		0.17	0.67	0.17	1.99	1.99	85.00	85.00
24	abC	0.17	0.17	0.67	2.01	2.05	88.00	84.00	

Explicación: La muestra 6 tuvo 4 repeticiones, a razón de que se dudó de la fabricación de las primeras muestras, y se realizaron dos más.

Tabla 40. Resultados de mezcla con 30% de polímero

	Material	%	MUESTRAS			DENSIDAD [gr/cm ³]		RESISTENCIA [Kg/cm ²]	
			PS	PP	PELD	1	2	1	2
8	A	30%	1	0	0	1.81	1.77	35.00	34.00
9	B		0	1	0	1.84	1.84	45.00	48.00
10	C		0	0	1	1.91	1.89	38.00	38.00
11	AB		0.5	0.5	0	1.81	1.83	32.00	34.00
12	AC		0.5	0	0.5	1.84	1.86	40.00	48.00
13	BC		0	0.5	0.5	1.88	1.83	58.00	60.00
14	ABC		0.33	0.33	0.33	1.86	1.86	41.00	55.00
25	Abc		0.67	0.17	0.17	1.85	1.82	42.00	41.00
26	aBc		0.17	0.67	0.17	1.83	1.81	51.00	48.00
27	abC		0.17	0.17	0.67	1.84	1.86	51.00	55.00

Tabla 41. Resultados de mezcla con 40% de polímero

	Material	%	MUESTRAS			DENSIDAD [gr/cm ³]		RESISTENCIA [Kg/cm ²]	
			PS	PP	PELD	1	2	1	2
15	A	40%	1	0	0	1.47	1.51	5.00	8.00
16	B		0	1	0	1.71	1.73	44.00	45.00
17	C		0	0	1	1.77	1.74	25.00	24.00
18	AB		0.5	0.5	0	1.66	1.66	34.00	32.00
19	AC		0.5	0	0.5	1.57	1.59	18.00	18.00
20	BC		0	0.5	0.5	1.66	1.62	27.00	26.00
21	ABC		0.33	0.33	0.33	1.60	1.60	25.00	19.00
28	Abc		0.67	0.17	0.17	1.57	1.63	23.00	20.00
29	aBc		0.17	0.67	0.17	1.62	1.59	35.00	37.00
30	abC		0.17	0.17	0.67	1.58	1.65	28.00	30.00

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS

El siguiente capítulo explica cuatro perspectivas de análisis de resultados: tecnológica, estadística, ambiental y económica financiera (costo/beneficio).

Para entender si los materiales experimentales se pueden considerar hormigones alivianados, utilizaremos los parámetros indicados en la tabla 42.

Tabla 42. Parámetros para hormigones livianos

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO
Densidad	[kg/cm ³]	300	1900
Resistencia	[MPa]	0.7	17
	[kg/cm ²]	7.14	173.35

Explicación: parámetros de los hormigones livianos.

Tomado de: Valdez L. y Suarez G., 2010, pp. 19-22.

5.1 Análisis tecnológico

Dado que el uso de los materiales en investigación está dictaminado por las variables densidad y resistencia, a continuación se indicará los motivos del comportamiento de estas variables en el trabajo.

5.1.1 Densidad

Tiene estrecha relación con los componentes que el material posee, siguiendo el siguiente comportamiento.

Fórmula 9. Comportamiento de la densidad de los materiales

$$\rho_T = \sum_{i=1}^n \rho_i$$

De donde:

ρ_T : densidad total o densidad de la mezcla [gr/cm³]

ρ_i : densidades de cada componente que conforman el material [gr/cm³]

A pesar de que no se tienen valores de densidad de los agregados utilizados en la experimentación (arena y piedra $\frac{3}{4}$), se puede inferir basándose en los resultados, que al reemplazar el hormigón habitual con un porcentaje de desechos plásticos, las densidades de los materiales producto decaen, es decir, las densidades de los nuevos componentes (plásticos reciclables) son menores que las de los agregados. El comportamiento descrito puede definirse de la siguiente manera.

Fórmula 10. Comportamiento de la densidad de hormigones con polímero

$$\rho_T \propto \frac{1}{\% \text{ de polímero}}$$

Explicación: al aumentar la concentración de polímero en una mezcla, la densidad del material resultante (ρ_T) disminuye, es decir tienen una proporcionalidad inversa.

5.1.2 Resistencia a la compresión

Cuando se habla de la resistencia a la compresión del hormigón, se hace alusión a la capacidad que tienen de resistir cargas (en kg/cm^2). Este parámetro tiene relación con la cantidad de cemento que posee un hormigón, ya que el cemento al hidratarse genera un proceso denominado fraguado, que consiste en endurecer la mezcla formando cristales que unen a los agregados. Se estima que el fraguado se realiza en un medio saturado de agua durante 7 días, llegando a alcanzar resistencias comprendidas entre el 65 al 75% de la resistencia alcanzada a los 28 días (edad en la que los hormigones tienden a alcanzar el 100% de su resistencia). Adicionalmente la resistencia de un hormigón depende de la dureza de sus componentes, la resistencia aumenta si la dureza de los agregados es mayor.

En el caso particular del trabajo desarrollado, la disminución de la resistencia de las mezclas, siguiendo los lineamientos expuestos, se explicaría por dos razones:

- Disminución de cemento en la composición.
- Aumento de agregado inerte de durezas menores en la reacción de fraguado, y póstumo endurecimiento.

5.2 Análisis estadístico

5.2.1 Hormigón convencional

Como primer paso de los resultados, se expondrá el estudio realizado al hormigón convencional de 210 realizado.

Tabla 43. Resultados de hormigón convencional

MATERIAL	EDAD	DENSIDAD [gr/cm ³]	RESISTENCIA [Kg/cm ²]
HORMIGÓN CONVENCIONAL DE 210	7	2.31	135
	28	2.23	115

A pesar de que el diseño original del hormigón ocupado indica que es de una resistencia de 210 kg/cm², los resultados en el laboratorio indica una resistencia a los 7 días de 135 kg/cm² y posteriormente, a los 28 días de 115 kg/cm². El “Laboratorio de mecánica de suelos y ensayos de materiales” de la Escuela Politécnica Nacional; explica este fenómeno cuando se desencofra de una manera inadecuada al material. Como se indicó anteriormente, la muestra a ser analizada a 28 días fue desencofrada de una manera muy complicada a razón de ser una de las dos muestras primeras en desencofrar. Posteriormente se indicará que la resistencia a partir de los 7 días hasta los 28 aumenta entre 35 y 45% (en los materiales experimentales, siendo el comportamiento normal del hormigón), si se toma estos datos como guía, vemos que de la resistencia de 135 kg/cm² representa el 64.3% de la resistencia estimada (210 kg/cm²), por lo tanto en base a la teoría se puede indicar que el hormigón convencional tiende a 210 kg/cm².

5.2.2 Pruebas preliminares de hormigón con desecho plástico

Como vimos antes, al utilizar polietileno de baja densidad en tiras se obtuvieron bajos resultados, por esta razón, en la tabla 44, que presenta los resultados de densidad (media) y de la resistencia a las dos edades, excluyendo a este desecho plástico.

Tabla 44. Resultados de pruebas previas de densidad (media) y resistencia, de plásticos reciclados relevantes (no LDPE en tiras)

%	MATERIAL	CODIFICACION	DENSIDAD [gr/cm ³]	RESISTENCIA [kg/cm ²]	
				7 DÍAS	28 DÍAS
20	POLIPROPILENO	PP	2.03	86	114
	POLIETILENO PELLET	LDPE	1.99	108	120
	POLIESTIRENO EXPANDIDO	PS	1.93	80	89
40	POLIPROPILENO	PP	1.82	47	50
	POLIETILENO PELLET	LDPE	1.67	24	37
	POLIESTIRENO EXPANDIDO	PS	1.56	9	14
60	POLIPROPILENO	PP	1.39	10	13
	POLIETILENO PELLET	LDPE	1.34	15	13
	POLIESTIRENO EXPANDIDO	PS	1.02	1	2

Por recomendación del Departamento de Matemáticas de la Universidad de las Américas, las pruebas previas se analizarán netamente por gráficos, para identificar las regiones con mayor incidencia en las variables a analizar, y así decidir dentro de que dosificaciones la experimentación debe desenvolverse.

5.2.2.1 Comportamiento del fraguado en muestras de pruebas preliminares

En primera instancia, se procederá a entender el comportamiento del material en el tiempo, es decir, el porcentaje de resistencia que adquiere a distintas edades (entre 7 y 28 días). Los laboratorios de la EPN sugirieron este análisis para conocer si los materiales estudiados tienen una dinámica similar a la que poseen los hormigones, es decir, su resistencia alcanza del 65 al 75% del total a los 7 días de vida (el 100% de la resistencia es alcanzada a los 28 días de vida).

POLIPROPILENO PELLETIZADO

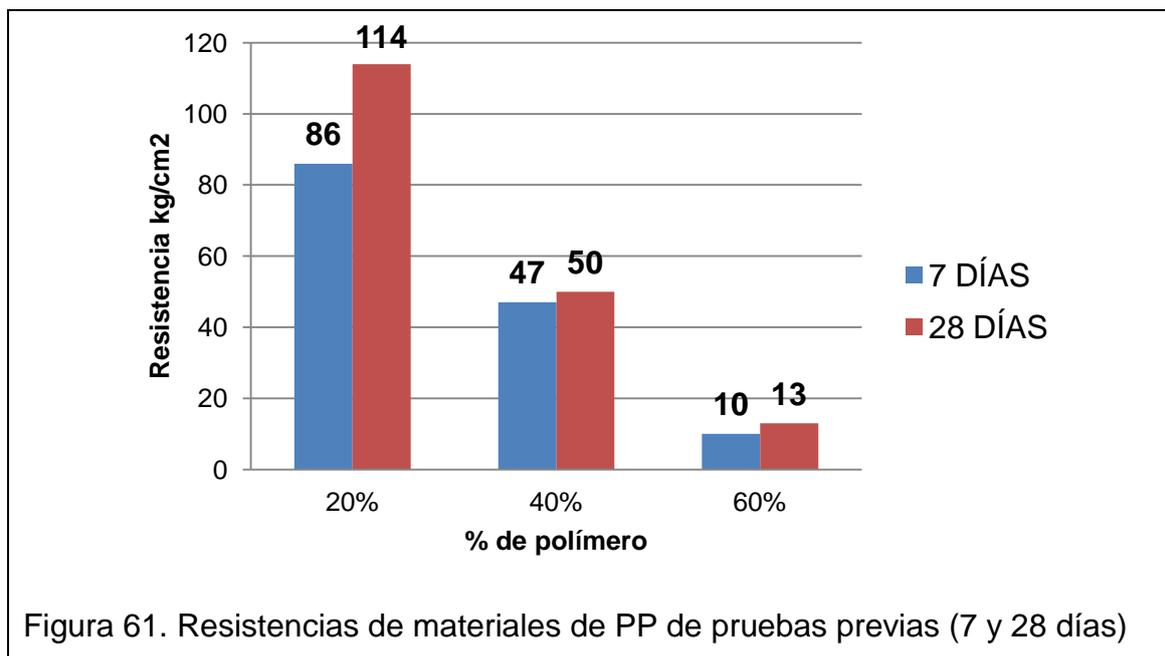


Figura 61. Resistencias de materiales de PP de pruebas previas (7 y 28 días)

Tabla 45. Porcentaje de resistencia en fraguado de PP

MATERIAL	% DE POLÍMERO	RESISTENCIA [kg/cm ²]		% RESISTENCIA EN FRAGUADO
		7 DÍAS	28 DÍAS	
POLIPROPILENO PP	20	86	114	75.44
	40	47	50	94.00
	60	10	13	76.92

A excepción del material creado con 40% de polipropileno, en los otros dos materiales a los 7 días de vida, con respecto del material con 28 días de vida, podemos ver un aumento del 75.44% y 76.92%; por lo tanto se encuentra dentro del fraguado estimado teórico. Por otro lado el material con 40% de polipropileno tuvo, en su período de fraguado, un total 94% de la resistencia a los 7 días de vida.

POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD PELLETIZADO

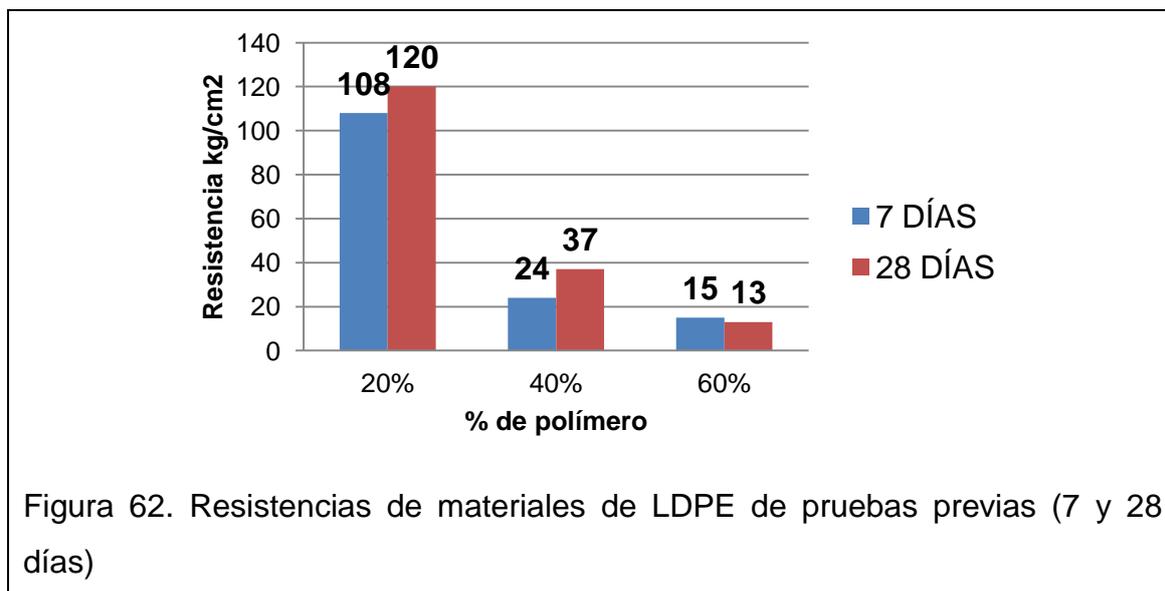


Figura 62. Resistencias de materiales de LDPE de pruebas previas (7 y 28 días)

Tabla 46. Porcentaje de resistencia en fraguado de LDPE

MATERIAL	% DE POLÍMERO	RESISTENCIA [kg/cm ²]		% RESISTENCIA EN FRAGUADO
		7 DÍAS	28 DÍAS	
POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD LDPE	20	108	120	90.00
	40	24	37	64.86
	60	15	13	115.38

Los materiales con polietileno de baja densidad pelletizado con 20% de polímero no se comportan en base a lo habitual en fraguado, es decir alcanzó resistencias a los 7 días del 90% de la resistencia total a los 28 días.

Los materiales con 40% de polímero entran en los procesos habituales de resistencias en fraguado, es decir alcanzó una resistencia total en fraguado correspondiente al 64.86% del total a los 28 días.

Los materiales con 60% de polímero, las resistencias a los 7 días son mayores que las obtenidas en el material a los 28 días, la razón es la misma con por la que el hormigón convencional de 28 días fue menor que su análogo de 7 días, es decir, por que al momento de desencofrar la muestra hubieron complicaciones y por ende alteraciones.

POLIESTIRENO EXPANDIDO TRITURADO

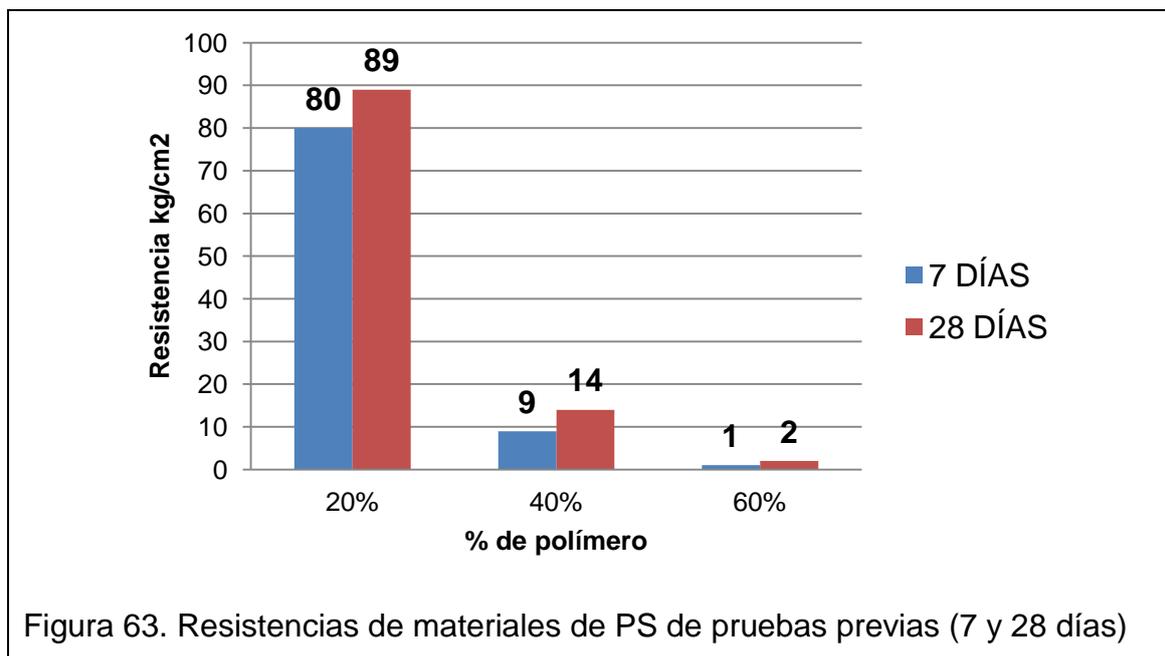


Figura 63. Resistencias de materiales de PS de pruebas previas (7 y 28 días)

Tabla 47. Porcentaje de resistencia en fraguado de PS

MATERIAL	% DE POLÍMERO	RESISTENCIA [kg/cm ²]		% RESISTENCIA EN FRAGUADO
		7 DÍAS	28 DÍAS	
POLIESTIRENO EXPANDIDO PS	20	80	89	89.89
	40	9	14	64.29
	60	1	2	50.00

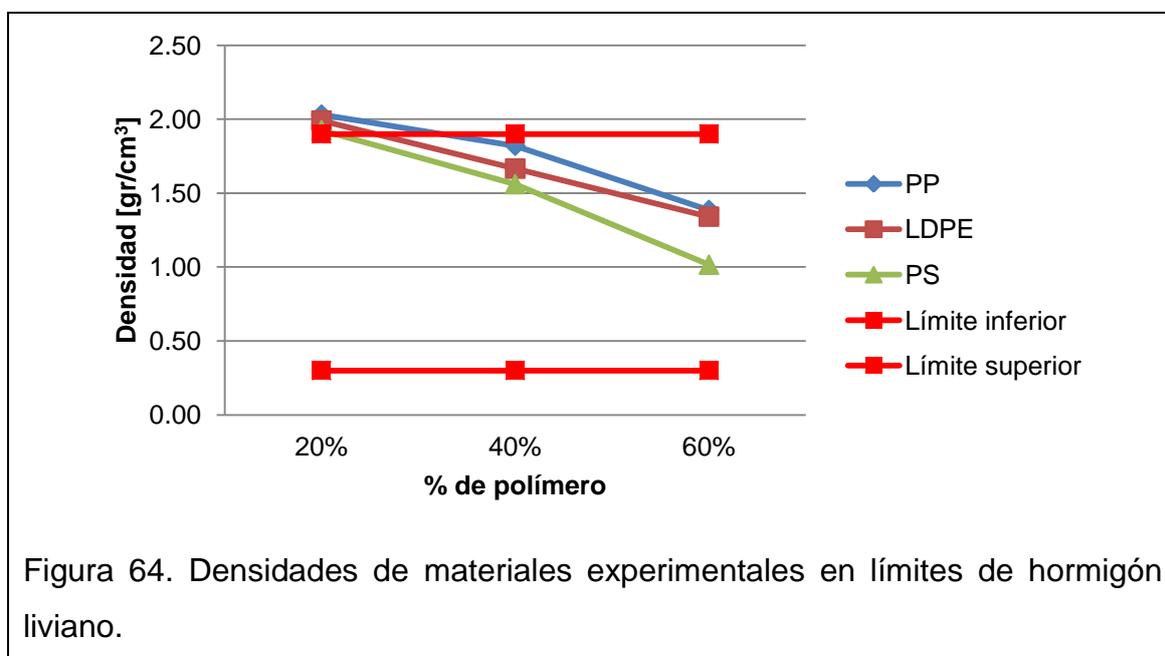
En el caso del poliestireno expandido observamos que los materiales con 20 y 60% de polímero se comportan de una manera no habitual como indica la teoría, ya que, las resistencias adquiridas en el proceso de fraguado fueron de 89.89 y 50% respectivamente de la resistencia adquirida a los 28 días.

El material creado con 40% de polímero se encuentra dentro de los límites que la teoría indica para la resistencia adquirida en el proceso de fraguado; alcanzando el 64.29% de la resistencia total adquirida a los 28 días.

5.2.2.2 Análisis de la densidad y resistencia de muestras de pruebas preliminares de hormigón con desecho

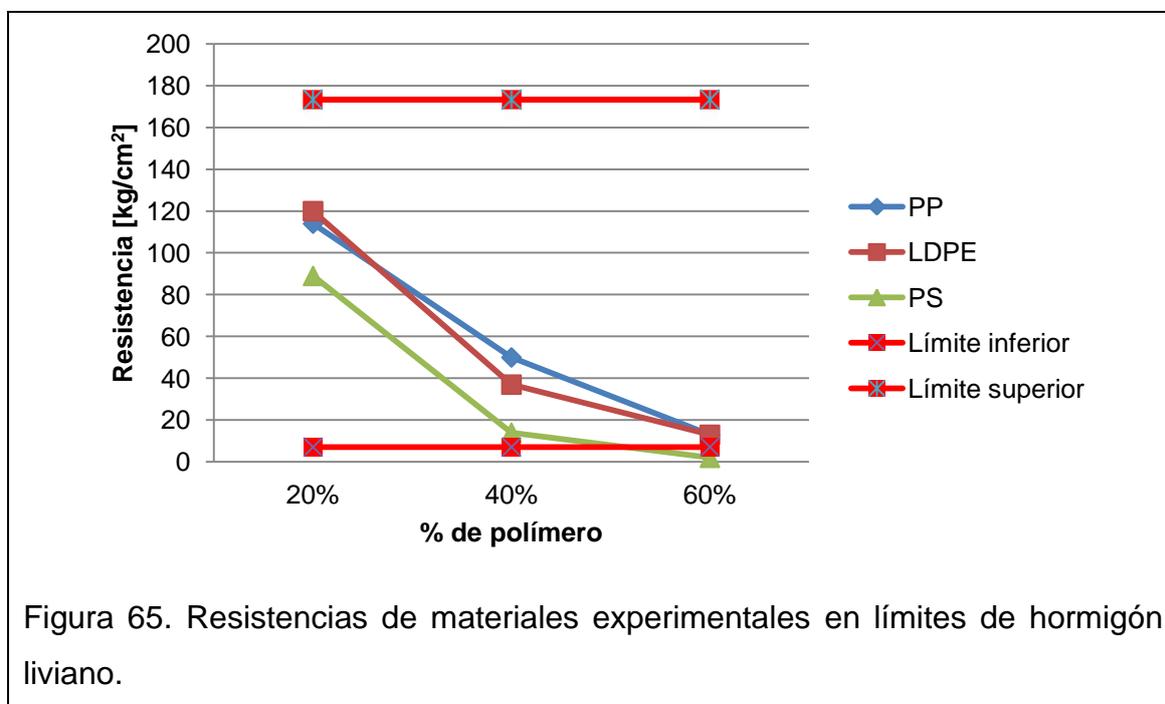
Con el fin de analizar la validez de los materiales a continuación se analizarán los resultados obtenidos solamente a los 28 días de vida para la variable de resistencia, ya que teóricamente a esa edad se alcanza un material de resistencia máxima. El análisis de la densidad será analizado de todas las muestras.

En primer lugar para entender el comportamiento de estos materiales, mediante las figuras 64 y 65, se explicará cuáles de ellos se encuentran en los límites admisibles de los hormigones livianos.



Vemos que en todos los materiales con una cantidad de 20% de polímero se encuentran fuera de los límites indicados para hormigones alivianados, es decir sus densidades son mayores a 1.9 gr/cm³; el promedio de las densidades de los materiales con 20% de polímero es 17.8% mayor a la densidad promedio entre los materiales con 40% de polímero, y es 59% mayor a la densidad promedio de los materiales con 60% de polímero.

Adicionalmente, la densidad promedio de los materiales con 40% de polímero es 34.89% mayor a la densidad promedio de los materiales con 60% de polímero.



Como se puede ver los materiales que contienen en su composición hasta un 60% de polímero, en especial el material hecho con poliestireno expandido, se encuentra por debajo del límite teórico de los hormigones livianos (0.7 MPa ó 7.14 kg/cm²), los otros materiales más cercanos al extremo inferior de los hormigones livianos son el polipropileno pelletizado y el polietileno de baja densidad pelletizado, cada uno con una resistencia de 13 kg/cm².

Por las razones antes presentadas se decidió experimentar materiales, en la siguiente etapa, con polímeros en proporciones comprendidas entre 20 y 40%; a pesar de que se observó que ningún material con 20% de polímero no se encontró dentro de los límites de la densidad de los hormigones livianos, se tomó la decisión de evaluar materiales en mezcla (unión de varios polímeros) entre estas cantidades de polímero porque se buscó la mejor resistencia a densidades adecuadas, región comprendida entre 20 y 40% de proporción de polímero con hormigón.

5.2.3 Muestras de materiales experimentales (mezclas)

En las muestras de materiales experimentales se analizarán materiales con contenido de polímero comprendido entre 20 y 40%, puntualmente, las siguientes dosificaciones: 20, 30 y 40% de polímero junto con hormigón. En este caso, se aplicará un diseño experimental de mezcla conocido como “simplex lattice aumentado”, ya explicado anteriormente en el trabajo.

Se tomaron 30 tipos de materiales experimentales con dos repeticiones cada uno. Por lo tanto para analizarlos se sacaron las medias de estas repeticiones. Los análisis se harán de cada variable de respuesta de cada dosificación (densidad y resistencia), seleccionando el modelo de regresión más afín y su análisis de la varianza, como se indicó en la metodología.

5.2.3.1 Materiales con 20% de polímero

Tabla 48. Dosificación de mezclas de materiales con 20% de polímero

%	Proporción de plástico [cm ³]			DENSIDAD [gr/cm ³]	RESISTENCIA [Kg/cm ²]
	PS	PP	PELD		
20%	1060.29	0.00	0.00	1.89	58.00
	0.00	1060.29	0.00	1.89	52.00
	0.00	0.00	1060.29	2.01	55.00
	530.14	530.14	0.00	1.95	58.50
	530.14	0.00	530.14	2.01	65.50
	0.00	530.14	530.14	1.91	61.50
	353.43	353.43	353.43	1.96	80.00
	706.86	176.71	176.71	1.96	63.50
	176.71	706.86	176.71	1.99	85.00
	176.71	176.71	706.86	2.03	86.00

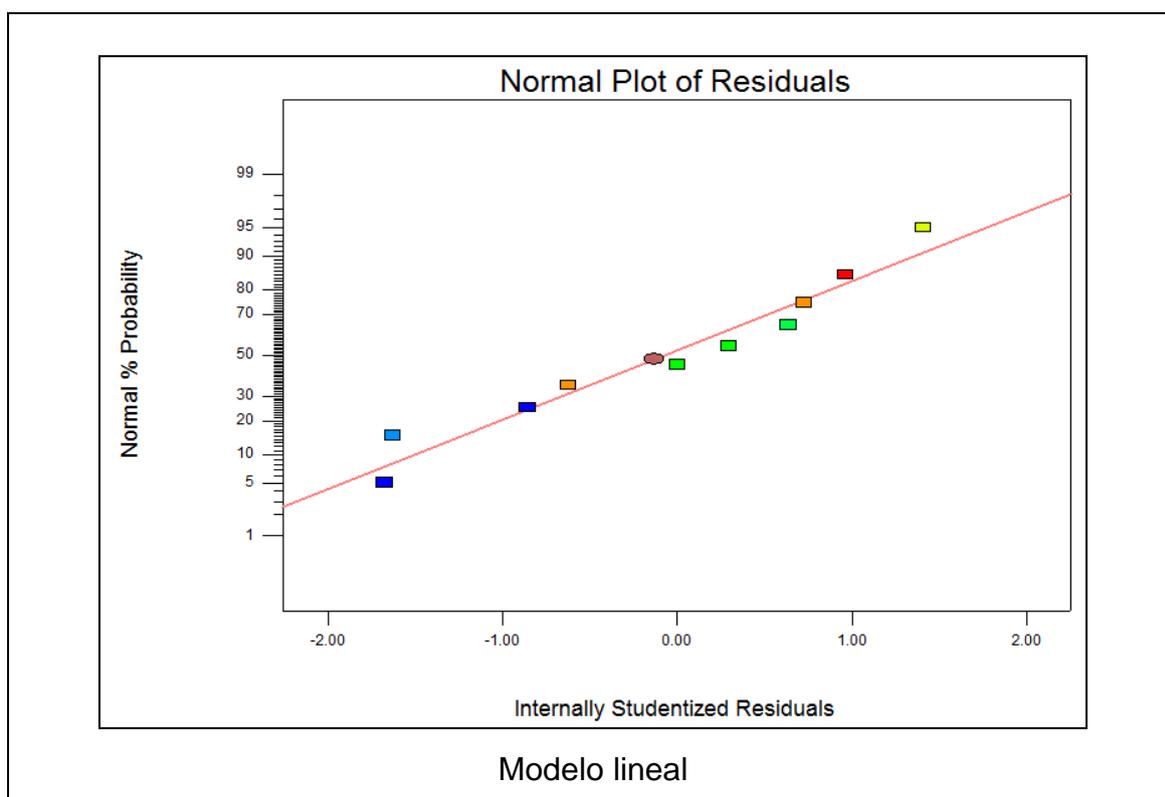
Explicación: el 20% representa 1060.29 cm³ en el molde cilíndrico.

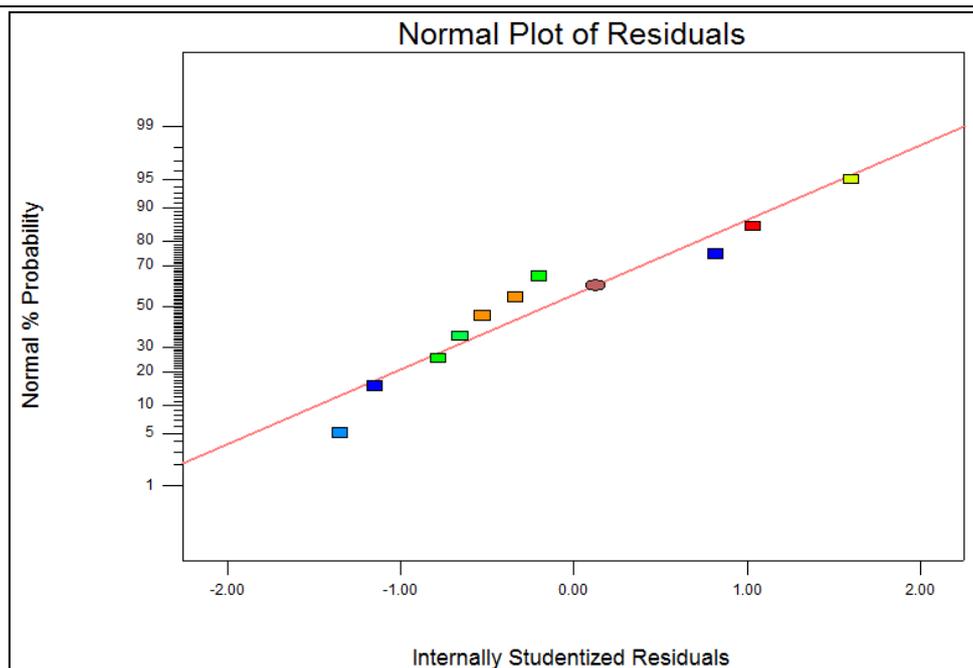
5.2.3.1.1 Análisis de la densidad de materiales con 20% de polímero

Tabla 49. Indicadores resumidos para mezclas con 20% polímero para la variable de respuesta densidad (identificación del modelo de regresión)

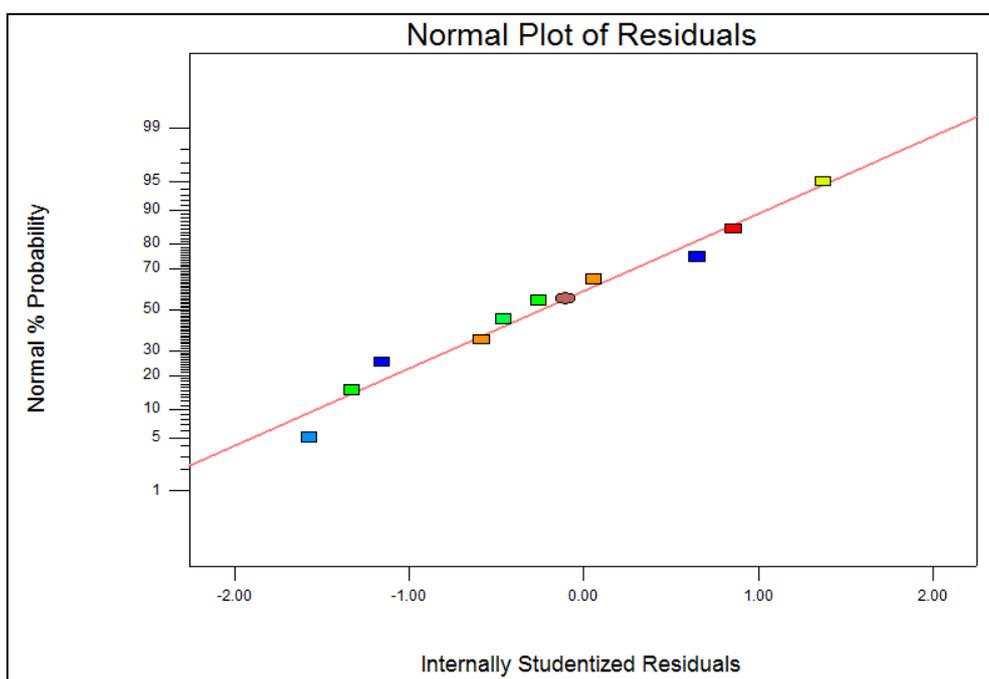
Modelo	Desviación estándar	R ² Ajustado	p-Valor	
Lineal	0.0422	0.3097	0.1134	
Cuadrático	0.0332	0.5726	0.2049	Sugerido
Cúbico especial	0.0374	0.4587	0.7175	

Explicación: vemos que la desviación estándar es menor en el modelo cuadrático, es decir, los datos se alejan de este modelo que de los otros, como vemos en la figura 66. El indicador R² Ajustado del modelo cuadrático se acerca más 1 y el p-Valor del modelo cuadrático es más lejano a 0.05 que el de los demás modelos.





Modelo cuadrático



Modelo cúbico especial

Figura 66. Desviación estándar de los datos en el modelo lineal, cuadrático y cúbico especial, para la variable densidad en materiales con 20% de polímero.

El modelo que más se ajusta es el “cuadrático”, en base a este se presenta la tabla ANOVA.

Tabla 50. ANOVA para modelo de regresión cuadrático para mezclas con 20% de polímero de la variable respuesta densidad

Fuente	Suma de Cuadrados	Diferencia de cuadrados	Cuadrado Medio	Razón F	Valor-p Prob > F	
Modelo	0.0188	5	0.0038	3.4117	0.1290	No Significativo
<i>Lineal</i>	0.0107	2	0.0054	4.8763	0.0846	
AB	0.0039	1	0.0039	3.5784	0.1315	
AC	0.0036	1	0.0036	3.3042	0.1433	
BC	0.0005	1	0.0005	0.4347	0.5457	
Error	0.0044	4	0.0011			
Total	0.0232	9				

En este caso vemos que la hipótesis nula se acepta, al ser Valor-p > 0.05.

Al aceptar la hipótesis nula, se entiende que las dosificaciones entre 20% mezcla de polímero (PP, LDPE ó PS) con el hormigón, no tienen efecto relevante sobre la densidad del material experimental.

Ho: Efecto de A=0

Ho: Efecto de B=0

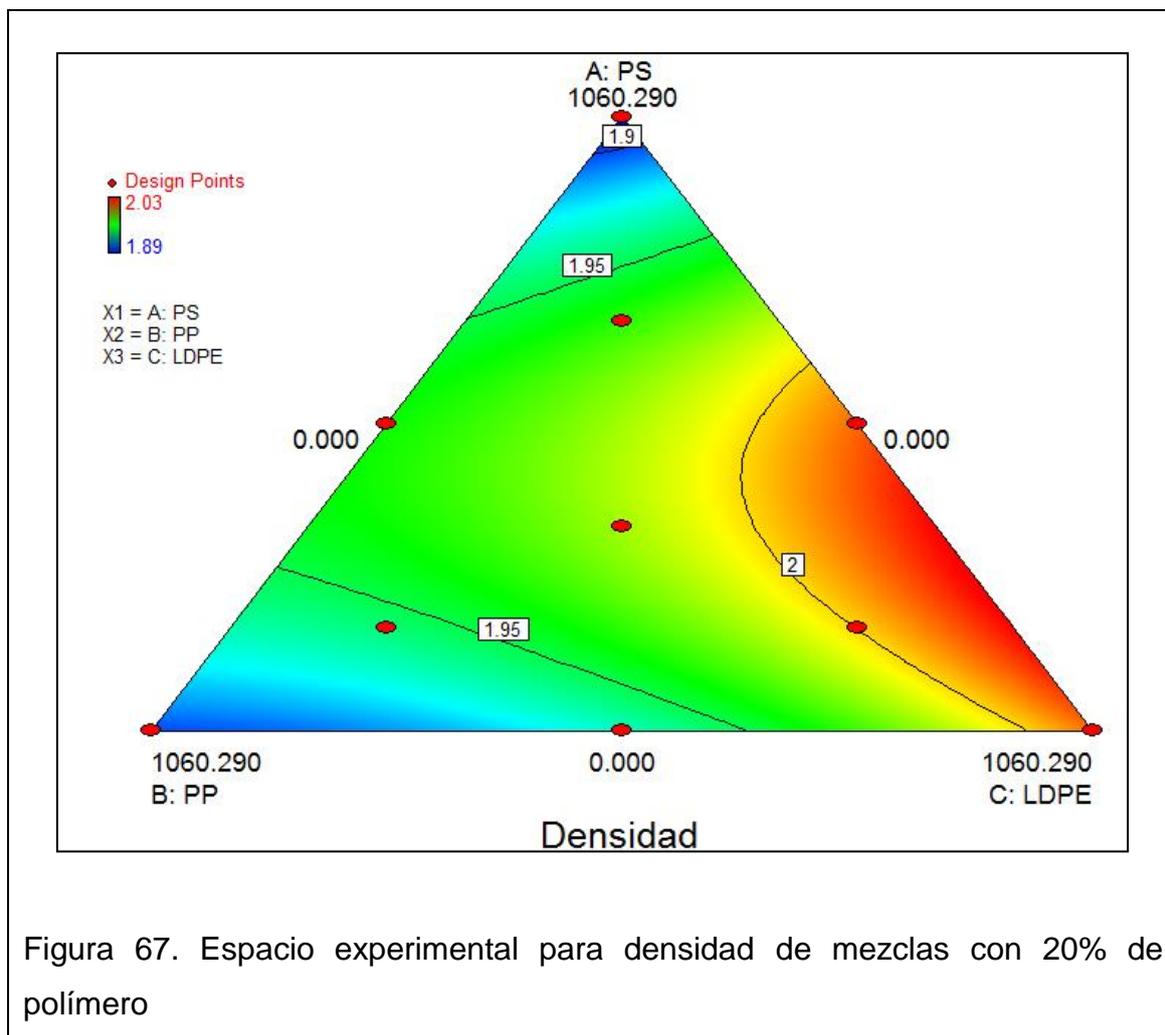
Ho: Efecto de C=0

Ho: Efecto de AB=0

Ho: Efecto de AC=0

Ho: Efecto de BC=0

El resultado del espacio experimental es el siguiente



El gráfico indica que hacia las proporciones que contienen mayor cantidad de PP y PS la densidad del material baja (lo que se busca) y en proporciones que tienden a valores intermedios entre PS y LDPE la densidad aumenta.

Como pudimos ver en la figura 67, los valores oscilan densidades entre 1.89 y 2.03, recordemos que se buscan materiales entre 0.3 y 1.9 de densidad; en la figura 114 se indica dentro de qué área del universo experimental tenemos los valores que buscamos.

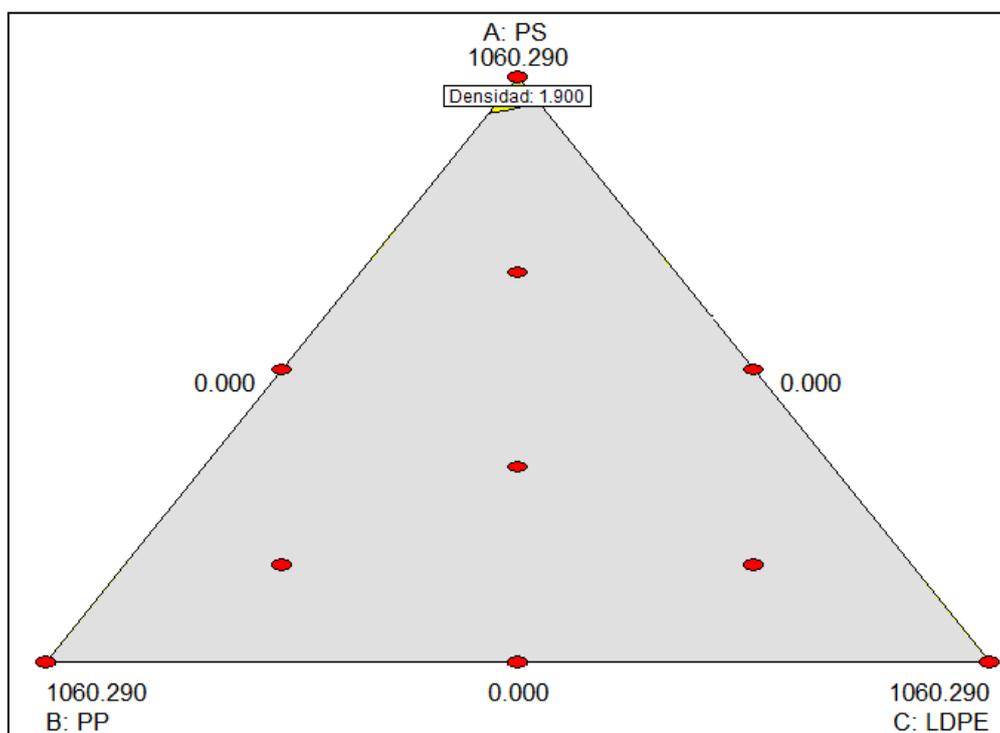


Figura 68. Zonas experimentales dentro de los límites de los hormigones livianos para mezclas con 20% de polímero

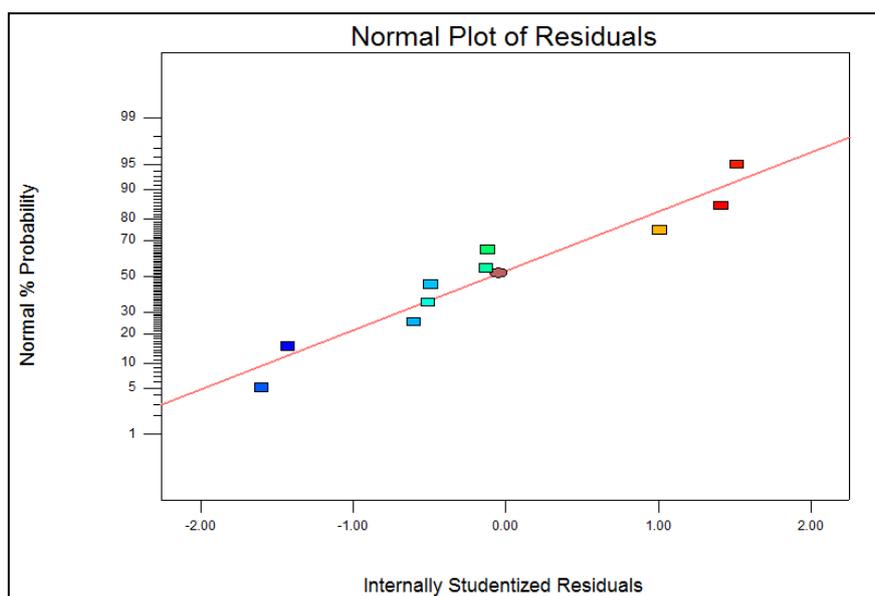
El área coloreada de amarillo indica la zona donde se encuentran densidades adecuadas para hormigones livianos, vemos que hacia el PS se tienen las densidades buscadas.

5.2.3.1.2 Análisis de la resistencia de materiales con 20% de polímero

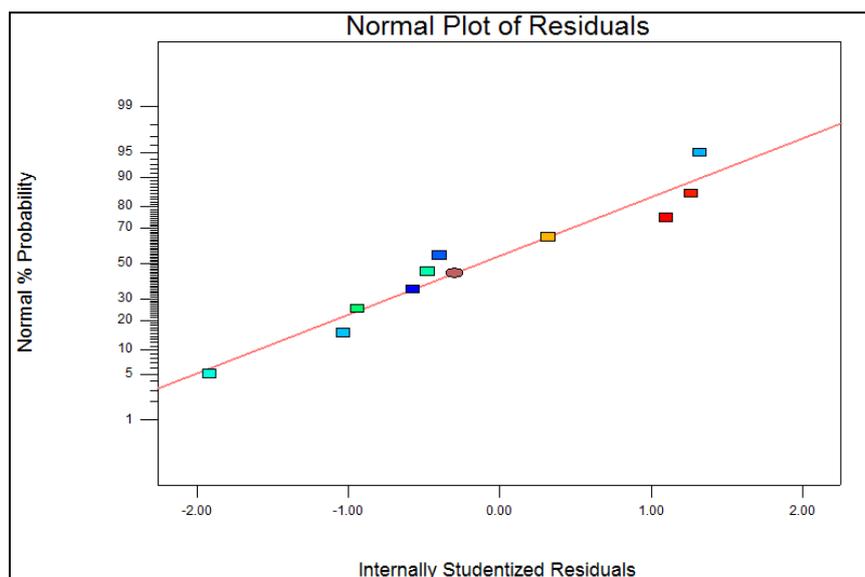
Tabla 51. Indicadores resumidos para mezclas con 20% polímero para la variable de respuesta resistencia (identificación del modelo de regresión)

Modelo	Desviación estándar	R ² Ajustado	p Valor	
Lineal	14.0652	-0.2552	0.9193	
Cuadrático	13.4783	-0.1526	0.4145	
Cúbico especial	11.8253	0.1128	0.2349	Sugerido

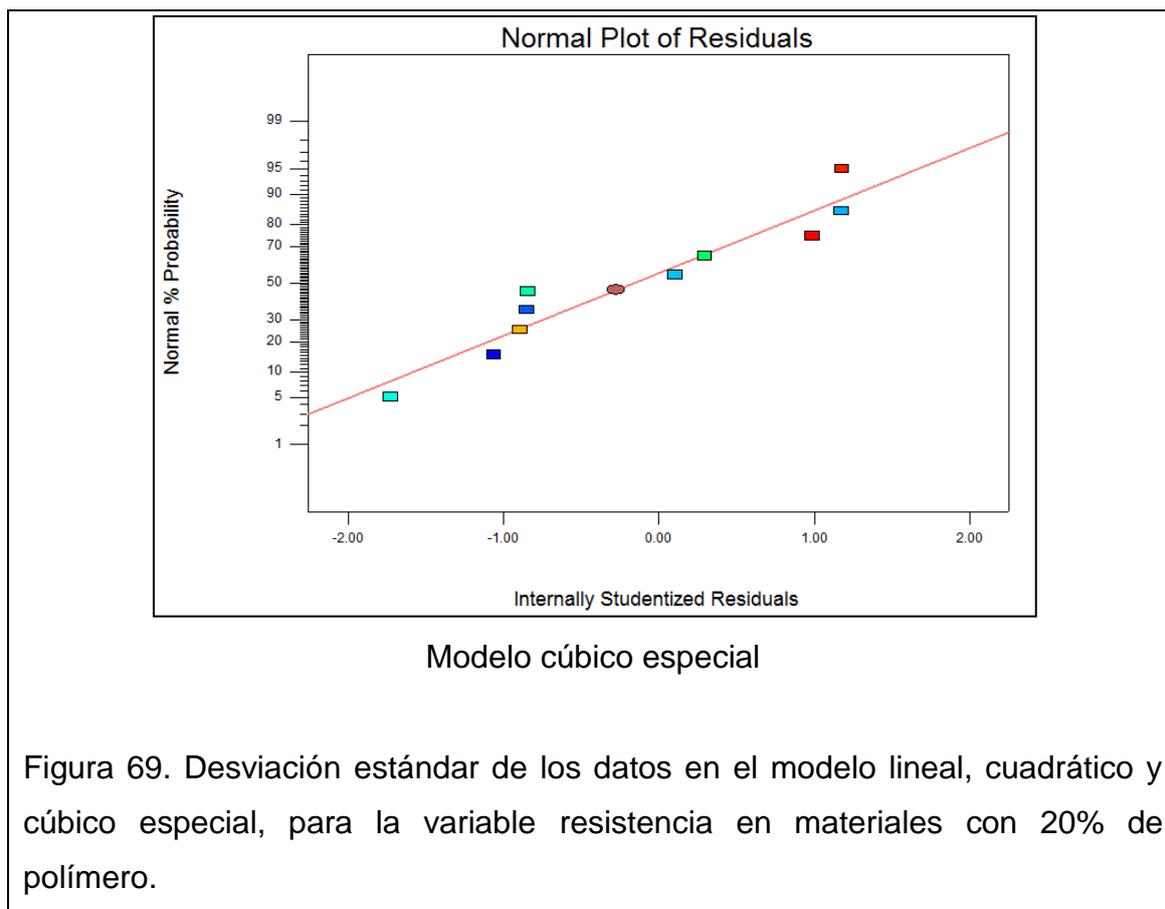
Explicación: vemos que la desviación estándar es menor en el modelo cúbico especial, es decir, los datos se alejan menos de este modelo que en los otros, como vemos en la figura 69. El indicador R^2 Ajustado del modelo cúbico especial se acerca más 1; en el caso del p-Valor, se observa que todos son mayores que 0.05 pero el p-Valor del modelo cúbico especial es el menor, y por lo tanto más cercano a 0.05 que el de los demás modelos.



Modelo lineal



Modelo cuadrático



El modelo que más se ajusta es el “cúbico especial”, en base a este se presenta la tabla ANOVA.

Tabla 52. ANOVA para modelo de regresión cúbico especial para mezclas con 20% de polímero de la variable respuesta resistencia

Fuente	Suma de Cuadrados	Diferencia de cuadrados	Cuadrado Medio	Razón F	Valor-p Prob > F	
Modelo	998.9880	6	166.4980	1.1907	0.4803	No Significativo
<i>Lineal</i>	33.6944	2	16.8472	0.1205	0.8906	
<i>AB</i>	7.4637	1	7.4637	0.0534	0.8322	
<i>AC</i>	48.8808	1	48.8808	0.3496	0.5960	
<i>BC</i>	80.1579	1	80.1579	0.5732	0.5040	
<i>ABC</i>	307.1471	1	307.1471	2.1965	0.2349	
Error	419.5120	3	139.8373			
Total	1418.5000	9				

En este caso vemos que la hipótesis nula no se rechaza, al ser Valor-p > 0.05.

Al aceptar la hipótesis nula, se entiende que las dosificaciones entre 20% mezcla de polímero (PP, LDPE ó PS) con el hormigón, no tienen efecto relevante sobre la resistencia del material experimental.

Ho: Efecto de A=0

Ho: Efecto de B=0

Ho: Efecto de C=0

Ho: Efecto de AB=0

Ho: Efecto de AC=0

Ho: Efecto de BC=0

Ho: Efecto de ABC=0

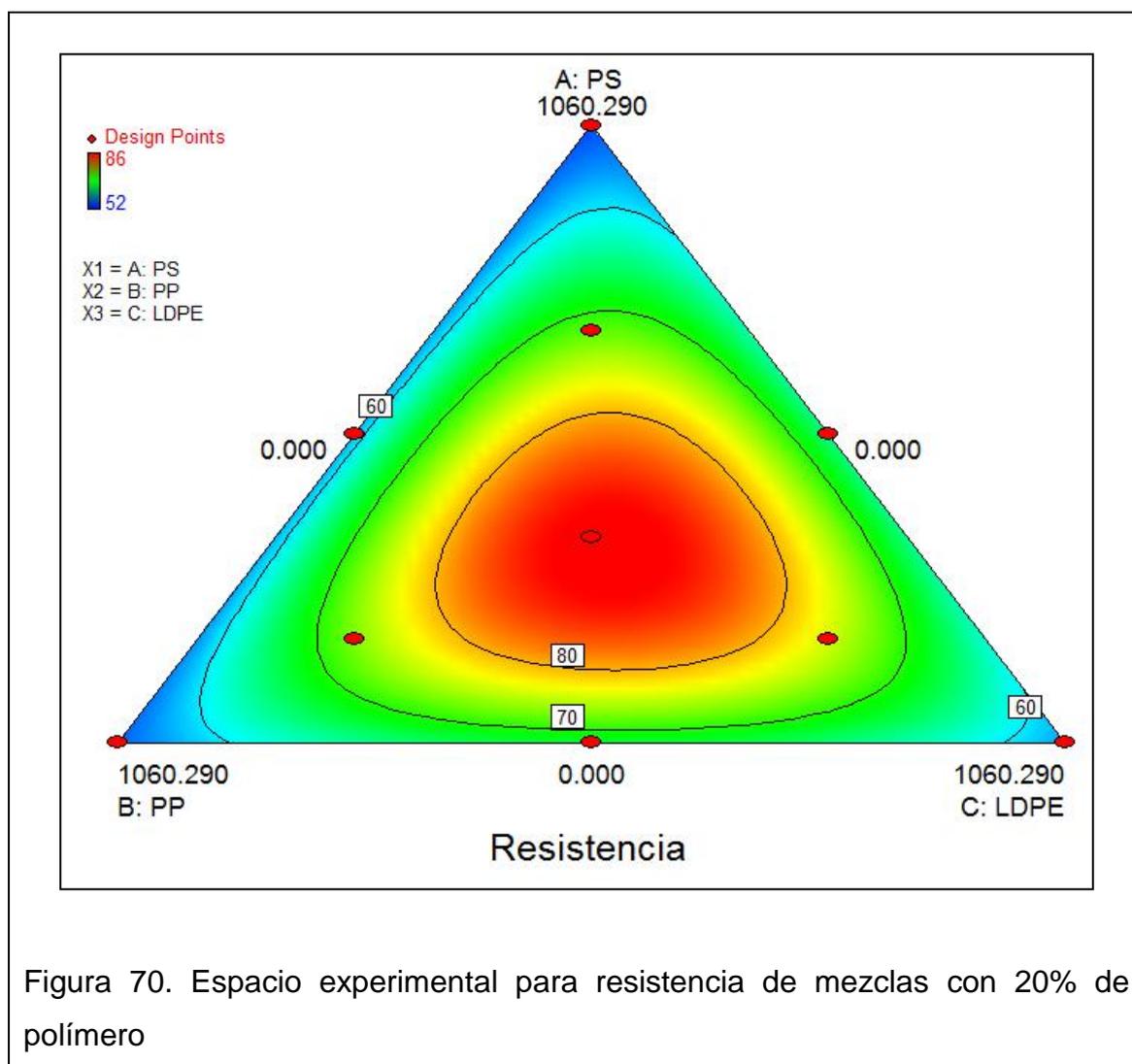


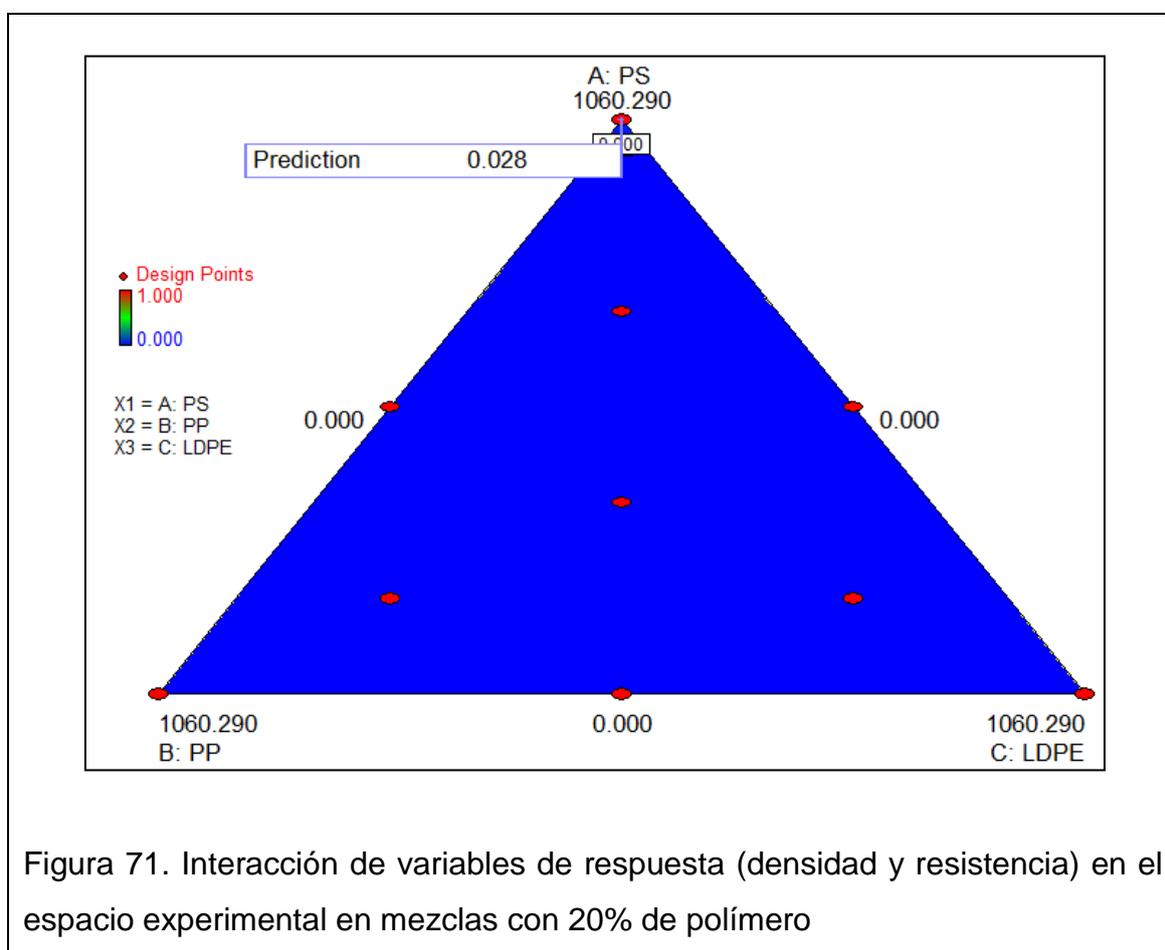
Figura 70. Espacio experimental para resistencia de mezclas con 20% de polímero

En este caso vemos que las dosificaciones que tienen un equilibrio entre los tres factores, generan las mejores resistencias.

Vemos que las resistencias oscilan entre 52 y 86 kg/cm², en este caso todo el universo experimental cae dentro de los límites de los hormigones alivianados (7.14 a 173.35 kg/cm²).

5.2.3.1.3 Resumen de materiales con 20% polímero

En la siguiente gráfica se puede apreciar las zonas donde tanto la densidad como la resistencia tienen coincidencia en los límites de los hormigones livianos y los mejores valores para los materiales buscados (máxima resistencia, mínima densidad).



Vemos que el gráfico indica en azul las áreas donde no existen coincidencia entre los datos de la densidad y resistencia.

Por lo tanto el universo experimental de materiales con 20% de polímero es muy limitado.

5.2.3.2 Materiales con 30% de polímero

Tabla 53. Dosificación de mezclas de materiales con 30% de polímero

%	Proporción de plástico [cm ³]			DENSIDAD [gr/cm ³]	RESISTENCIA [Kg/cm ²]
	PS	PP	PELD		
30%	1590.43	0.00	0.00	1.79	34.50
	0.00	1590.43	0.00	1.84	46.50
	0.00	0.00	1590.43	1.90	38.00
	795.22	795.22	0.00	1.82	33.00
	795.22	0.00	795.22	1.85	44.00
	0.00	795.22	795.22	1.86	59.00
	530.14	530.14	530.14	1.86	48.00
	1060.29	265.07	265.07	1.84	41.50
	265.07	1060.29	265.07	1.82	49.50
	265.07	265.07	1060.29	1.85	53.00

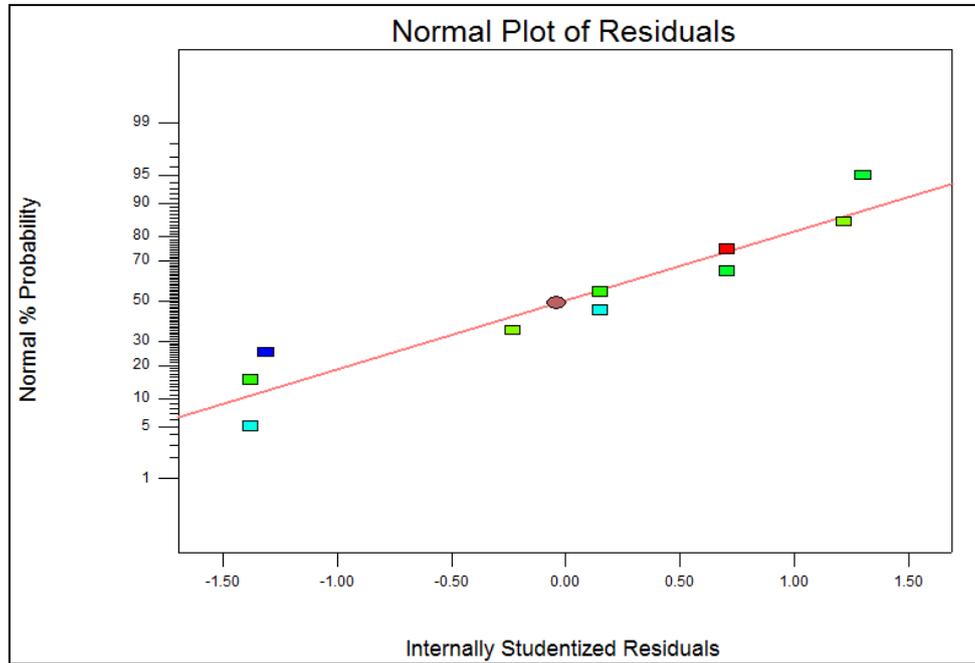
Explicación: el 30% representa 1590.43 cm³ en el molde cilíndrico.

5.2.3.2.1 Análisis de la densidad de materiales con 30% de polímero

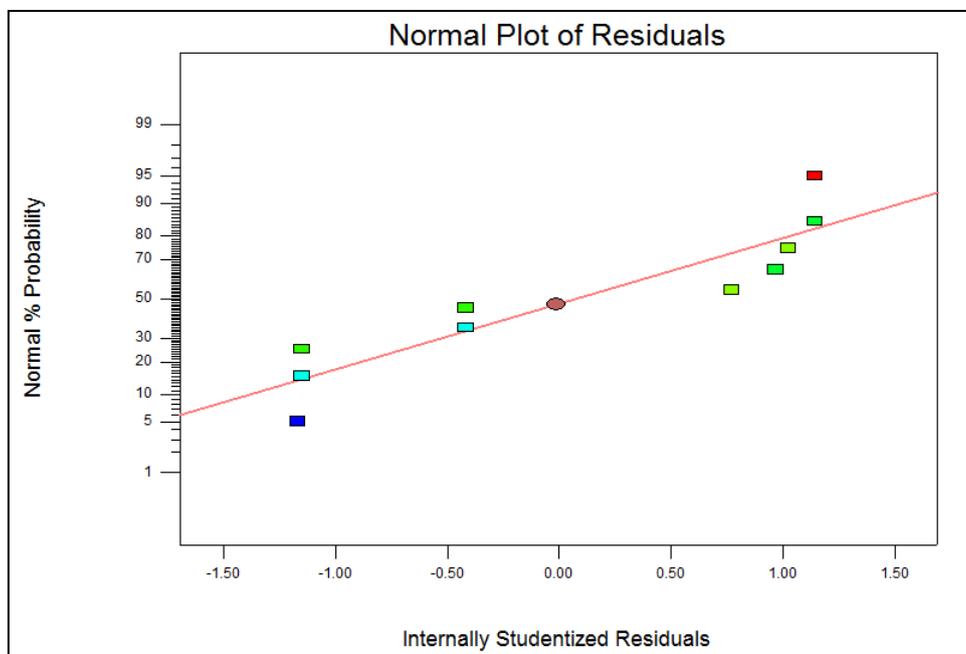
Tabla 54. Indicadores resumidos para mezclas con 30% polímero para la variable de respuesta densidad (identificación del modelo de regresión)

Modelo	Desviación estándar	R ² Ajustado	p Valor	
Lineal	0.0147	0.7514	0.0032	Sugerido
Cuadrático	0.0178	0.6331	0.8597	
Cúbico especial	0.0202	0.5275	0.7658	

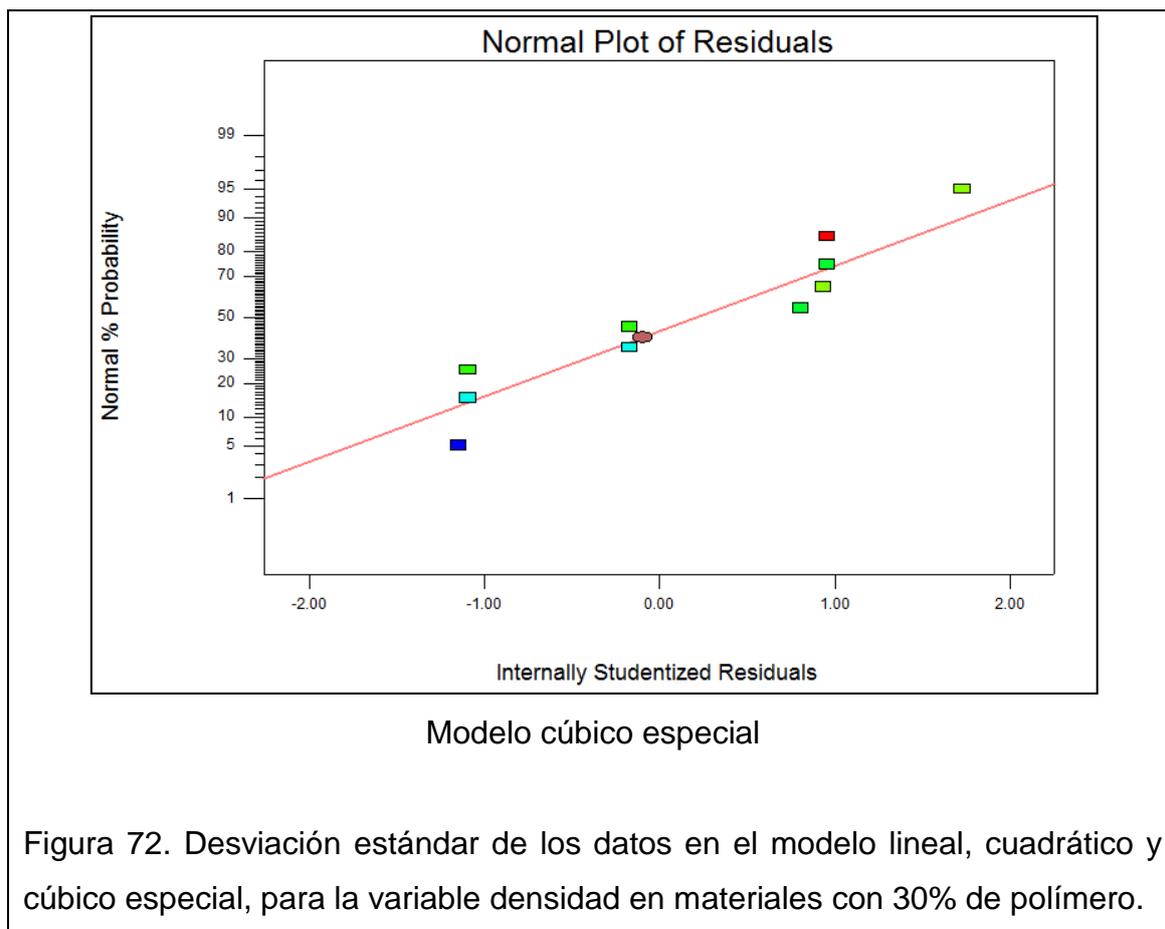
Explicación: vemos que la desviación estándar es menor en el modelo lineal, es decir, los datos se alejan menos de este modelo que de los otros, como vemos en la figura 72. El indicador R² Ajustado del modelo lineal se acerca más 1 y el p-Valor del modelo lineal es el menor, más lejano a 0.05 que el de los demás modelos.



Modelo lineal



Modelo cuadrático



El modelo que más se ajusta es el “lineal”, en base a este se presenta la tabla ANOVA.

Tabla 55. ANOVA para modelo de regresión lineal para mezclas con 30% de polímero de la variable respuesta densidad

Fuente	Suma de Cuadrados	Diferencia de cuadrados	Cuadrado Medio	Razón F	Valor-p Prob > F	
Modelo	0.0063	2	0.0032	14.6026	0.0032	Significativo
<i>Lineal</i>	0.0063	2	0.0032	14.6026	0.0032	
Error	0.0015	7	0.0002			
Total	0.0078	9				

En este caso vemos que la hipótesis nula se rechaza, al ser Valor-p < 0.05. Al rechazar la hipótesis nula, se entiende que las dosificaciones entre 30% mezcla de polímero (PP, LDPE ó PS) con el hormigón, tienen efecto relevante sobre la densidad del material experimental.

Dado que la hipótesis nula se ha rechazado, se deben identificar que dosificaciones o mezclas influyen representativamente en la variable respuesta densidad; por lo tanto en la tabla 56 podemos apreciar el “Coeficiente estimado” y “el CI 95%”, herramientas que nos ayudan a identificar que mezclas son las más influyentes.

Tabla 56. Identificación de mezclas con 30% de polímero, influyentes en la densidad del material

Componente	Coeficiente Estimado	Error estándar	CI 95% Bajo	CI 95% Alto
A-PS	1.80	0.01	1.78	1.83
B-PP	1.83	0.01	1.81	1.86
C-LDPE	1.89	0.01	1.87	1.92

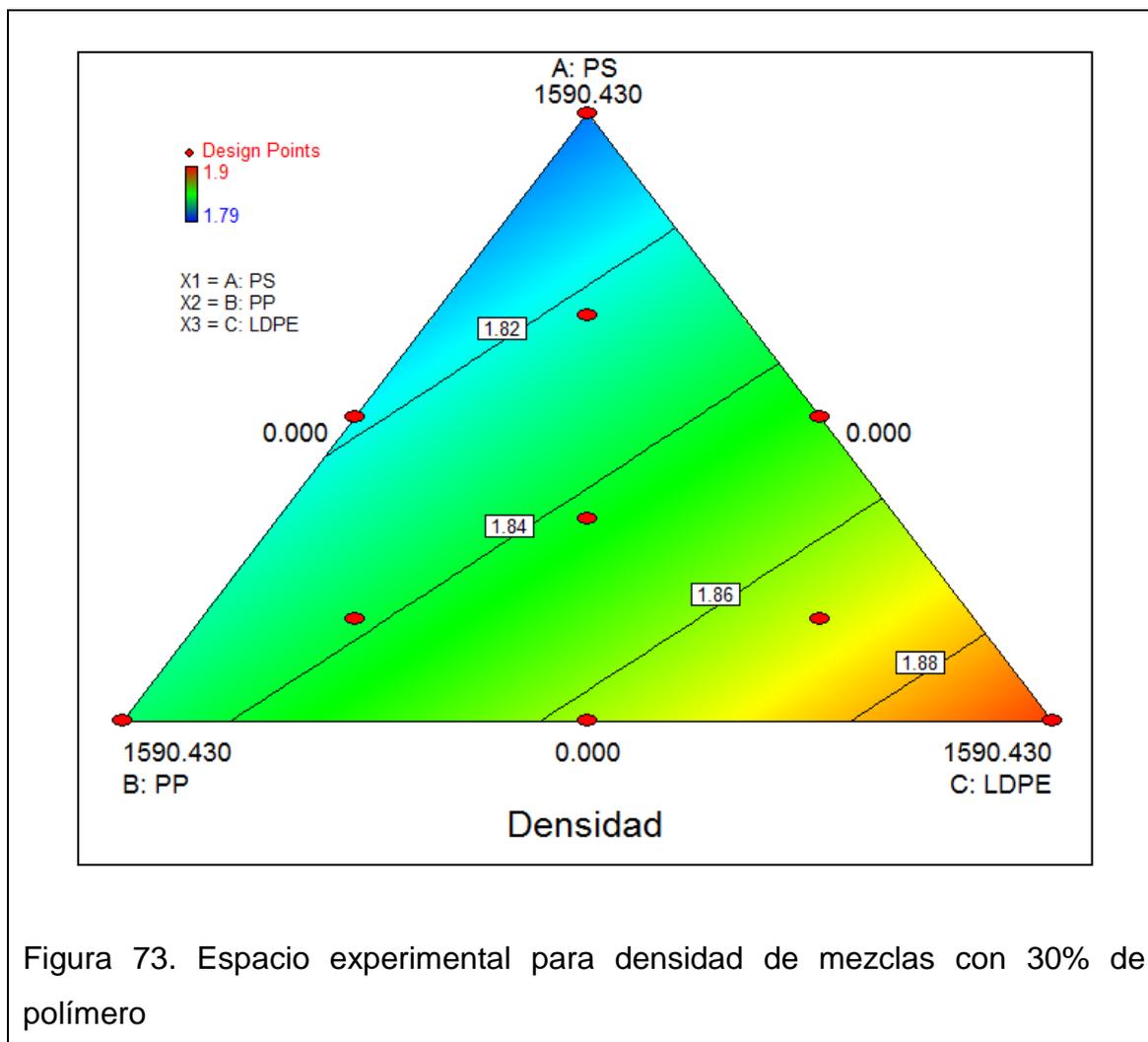
Vemos que ninguno de los verdaderos rangos de los componentes (CI 95%) pasa por cero, por lo tanto todos los componentes presentados son significativos. Por otro lado vemos que el coeficiente estimado para el componente “C-LDPE” es mayor, seguido por el componente “B-PP” y finalmente el componente “A-PS”.

Ho: Efecto de A \neq 0

Ho: Efecto de B \neq 0

Ho: Efecto de C \neq 0

En la figura 73 podemos apreciar el comportamiento de los componentes, siendo los influyentes positivos (aumentan la variable respuesta) los que poseen colores de gama roja, es decir los que poseen coeficientes estimados altos; y los influyentes negativos (disminuyen la variable respuesta) los que poseen colores de gama azul, es decir los que poseen coeficientes estimados bajos.



El gráfico indica que hacia las proporciones que contienen mayor cantidad de PS la densidad del material baja (lo que se busca) y en proporciones que tienden a mayor cantidad de LDPE la densidad aumenta.

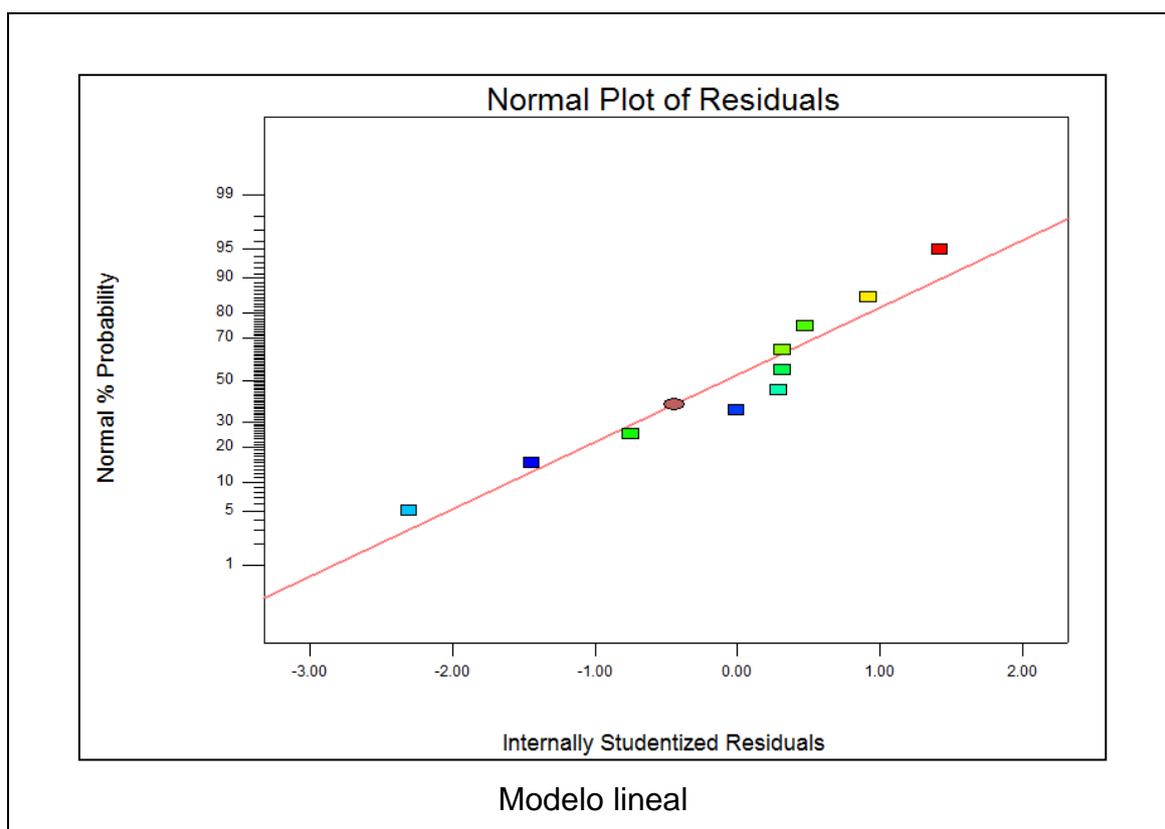
Como pudimos ver en la figura anterior, los valores oscilan densidades entre 1.79 y 1.9, recordemos que se buscan materiales entre 0.3 y 1.9 de densidad; por lo tanto todo el universo experimental es válido.

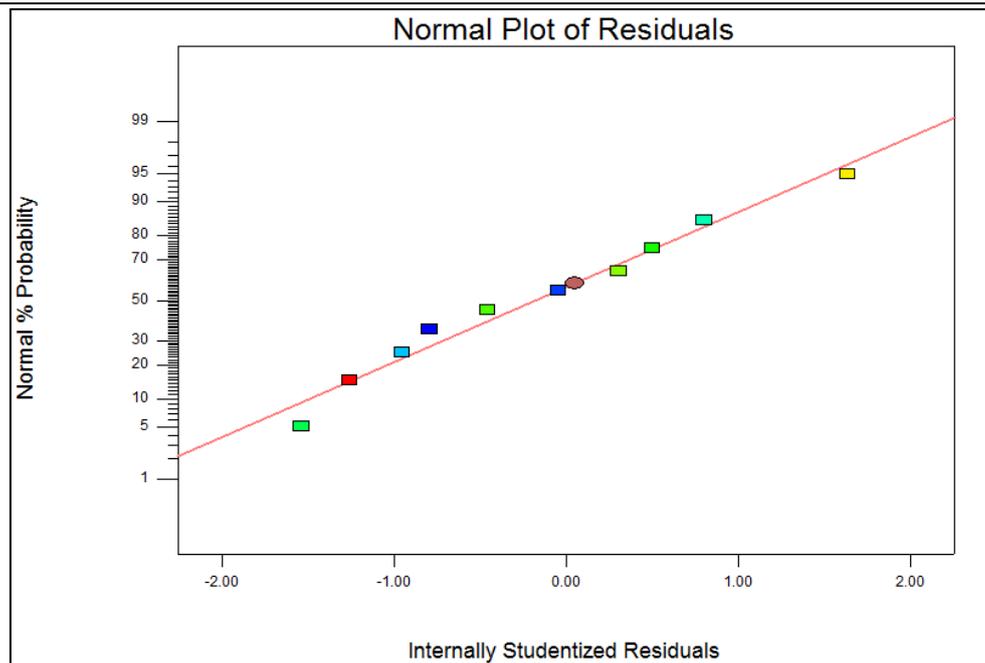
5.2.3.2.2 Análisis de la resistencia de materiales con 30% de polímero

Tabla 57. Indicadores resumidos para mezclas con 30% polímero para la variable de respuesta resistencia (identificación del modelo de regresión)

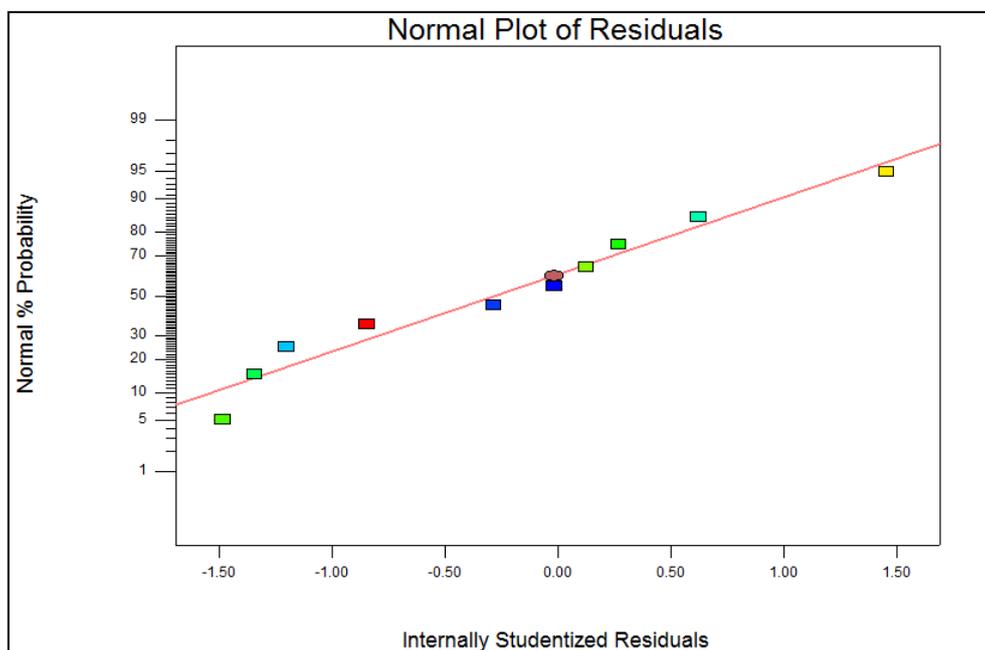
Modelo	Desviación estándar	R ² Ajustado	p-Valor	
Lineal	7.3096	0.2079	0.1835	
Cuadrático	1.8965	0.9467	0.0027	Sugerido
Cúbico especial	1.9330	0.9446	0.4245	

Explicación: vemos que la desviación estándar es menor en el modelo cuadrático, es decir, los datos se alejan menos de este modelo que de los otros, como vemos en la figura 74. El indicador R² Ajustado del modelo cuadrático se acerca más 1 y el p-Valor del modelo cuadrático es el menor, más lejano a 0.05 que el de los demás modelos.





Modelo cuadrático



Modelo cúbico especial

Figura 74. Desviación estándar de los datos en el modelo lineal, cuadrático y cúbico especial, para la variable resistencia en materiales con 30% de polímero.

El modelo que más se ajusta es el “cuadrático”, en base a este se presenta la tabla ANOVA.

Tabla 58. ANOVA para modelo de regresión cuadrático para mezclas con 30% de polímero de la variable respuesta resistencia

Fuente	Suma de Cuadrados	Diferencia de cuadrados	Cuadrado Medio	Razón F	Valor-p Prob > F	
Modelo	592.7136	5	118.5427	32.9597	0.0024	Significativo
<i>Lineal</i>	233.0833	2	116.5417	32.4034	0.0034	
AB	35.4215	1	35.4215	9.8486	0.0349	
AC	65.5951	1	65.5951	18.2381	0.0129	
BC	258.4200	1	258.4200	71.8514	0.0011	
Error	14.3864	4	3.5966			
Total	607.1000	9				

En este caso vemos que la hipótesis nula se rechaza, al ser Valor-p < 0.05. Al rechazar la hipótesis nula, se entiende que las dosificaciones entre 30% mezcla de polímero (PP, LDPE ó PS) con el hormigón, tienen efecto relevante sobre la resistencia del material experimental.

Dado que la hipótesis nula se ha rechazado, se deben identificar que dosificaciones o mezclas influyen representativamente en la variable respuesta resistencia; por lo tanto en la tabla 60 podemos apreciar el “Coeficiente estimado” y “el CI 95%”, herramientas que nos ayudan a identificar que mezclas son las más influyentes.

Tabla 59. Identificación de mezclas con 30% de polímero, influyentes en la resistencia del material

Componente	Coeficiente Estimado	Error estándar	CI 95% Bajo	CI 95% Alto
A-PS	34.52	1.83	29.44	39.60
B-PP	46.25	1.83	41.17	51.33
C-LDPE	38.48	1.83	33.40	43.56
AB	-26.45	8.43	-49.86	-3.05
AC	36.00	8.43	12.60	59.40
BC	71.45	8.43	48.05	94.86

Vemos que ninguno de los verdaderos rangos de los componentes (CI 95%) pasa por cero, por lo tanto todos los componentes presentados son significativos. Por otro lado vemos que el coeficiente estimado para el componente “BC” es mayor, seguido por el componente “B-PP”, “C-LDPE”, “AC”, “A-PS” y finalmente “AB”.

Ho: Efecto de A≠0

Ho: Efecto de B≠0

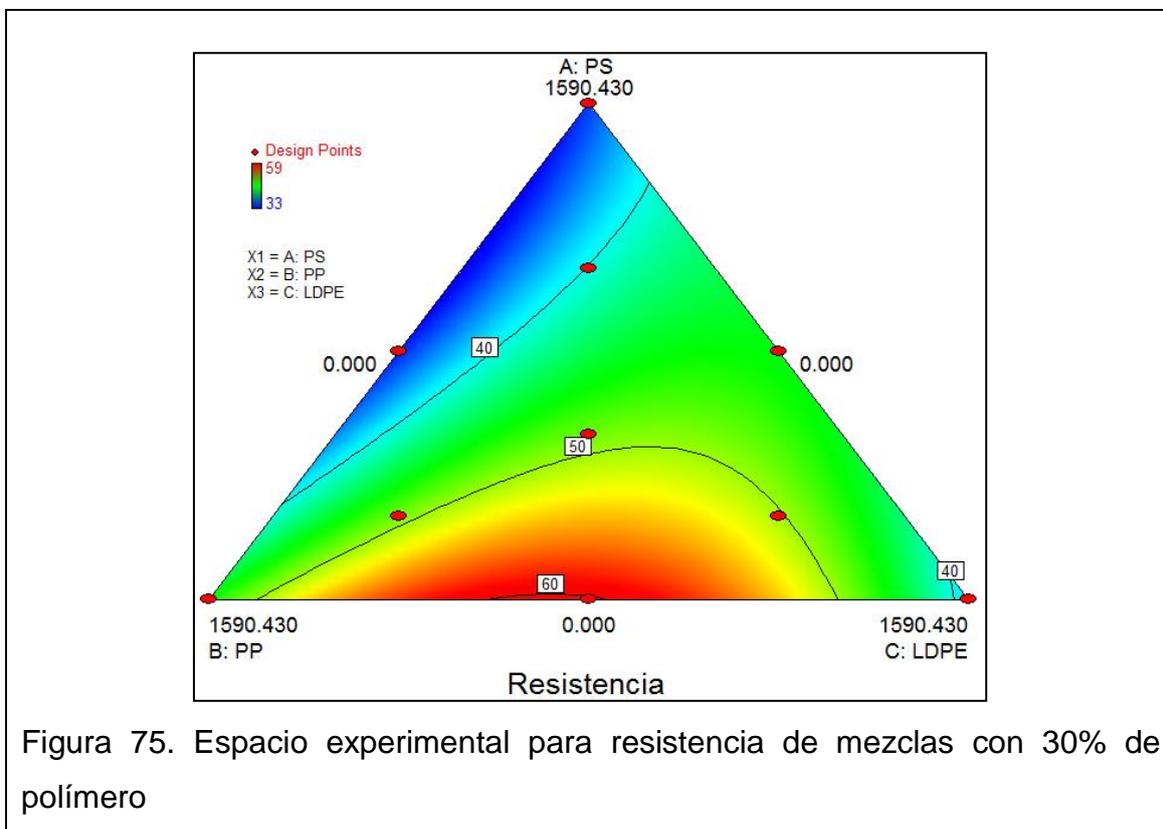
Ho: Efecto de C≠0

Ho: Efecto de AB≠0

Ho: Efecto de AC≠0

Ho: Efecto de BC≠0

En la figura 75 podemos apreciar el comportamiento de los componentes, siendo los influyentes positivos (aumentan la variable respuesta) los que poseen colores de gama roja, es decir los que poseen coeficientes estimados altos; y los influyentes negativos (disminuyen la variable respuesta) los que poseen colores de gama azul, es decir los que poseen coeficientes estimados bajos.

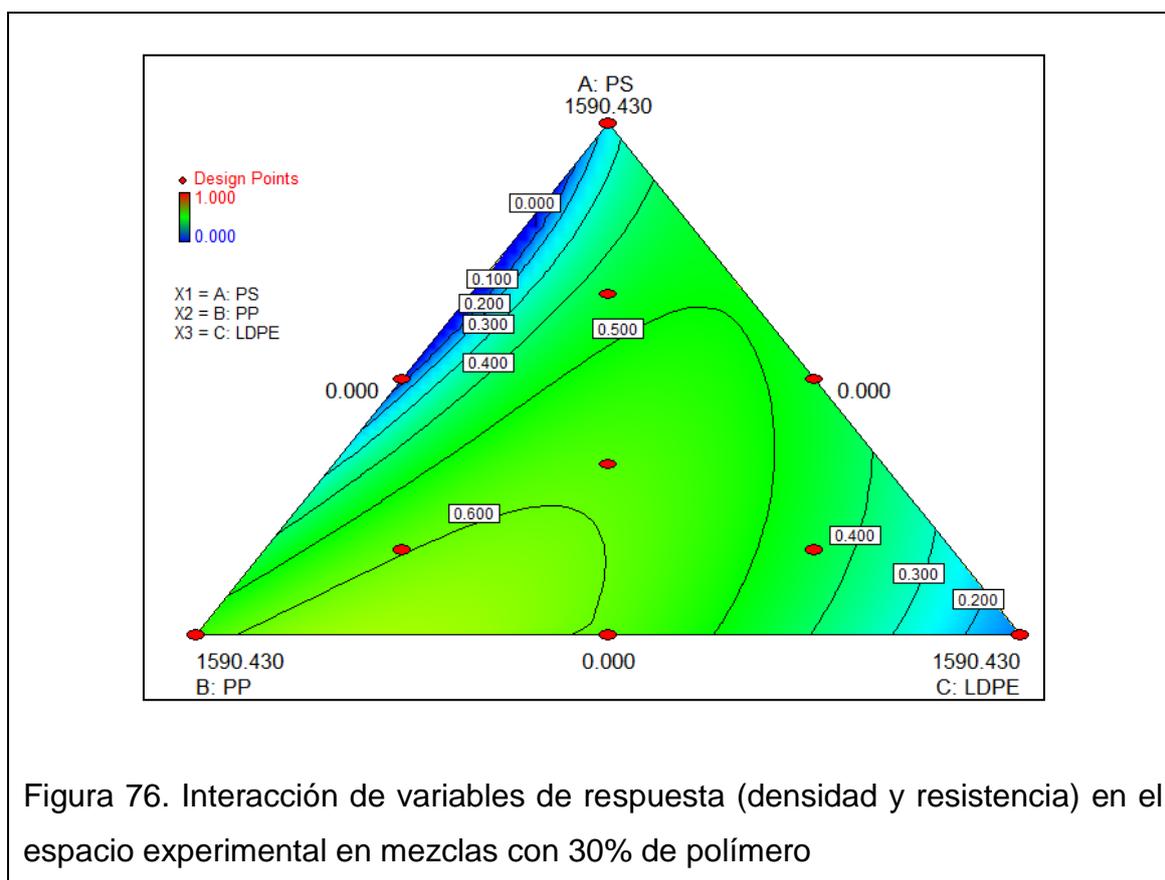


En proporciones que tienden a valores intermedios entre PP y LDPE la resistencia aumenta (lo que se busca), y en proporciones a valores entre PP que tienden hacia PS la resistencia disminuye.

Vemos que las resistencias oscilan entre 33 y 59 kg/cm², en este caso todo el universo experimental cae dentro de los límites de los hormigones alivianados (7.14 a 173.35 kg/cm²).

5.2.3.2.3 Resumen de materiales con 30% polímero.

En la siguiente gráfica se puede apreciar las zonas donde tanto la densidad como la resistencia tienen coincidencia en los límites de los hormigones livianos y los mejores valores para los materiales buscados (máxima resistencia, mínima densidad).



Como pudimos analizar anteriormente, los componentes que influyen en esta superficie son los puntos de dosificación conocidos como: A, B, C, AB, AC Y BC. En la gráfica vemos que las dosis de polímeros donde se obtiene una máxima resistencia y una mínima densidad tienden a estar entre la mitad de la

dosificación de PP y LDPE (BC), y la dosificación máxima de PP (B). .Por lo tanto en materiales con 30% de polímero, las dosificaciones para alcanzar materiales aceptables son amplias.

5.2.3.3 Materiales con 40% de polímero

Tabla 60. Dosificación de mezclas de materiales con 40% de polímero

%	Proporción de plástico [cm ³]			DENSIDAD [gr/cm ³]	RESISTENCIA [Kg/cm ²]
	PS	PP	PELD		
40%	2120.58	0.00	0.00	1.49	6.50
	0.00	2120.58	0.00	1.72	44.50
	0.00	0.00	2120.58	1.76	24.50
	1060.29	1060.29	0.00	1.66	33.00
	1060.29	0.00	1060.29	1.58	18.00
	0.00	1060.29	1060.29	1.64	26.50
	706.86	706.86	706.86	1.60	22.00
	1413.72	353.43	353.43	1.60	21.50
	353.43	1413.72	353.43	1.61	36.00
	353.43	353.43	1413.72	1.62	29.00

Explicación: el 40% representa 2120.58 cm³ en el molde cilíndrico.

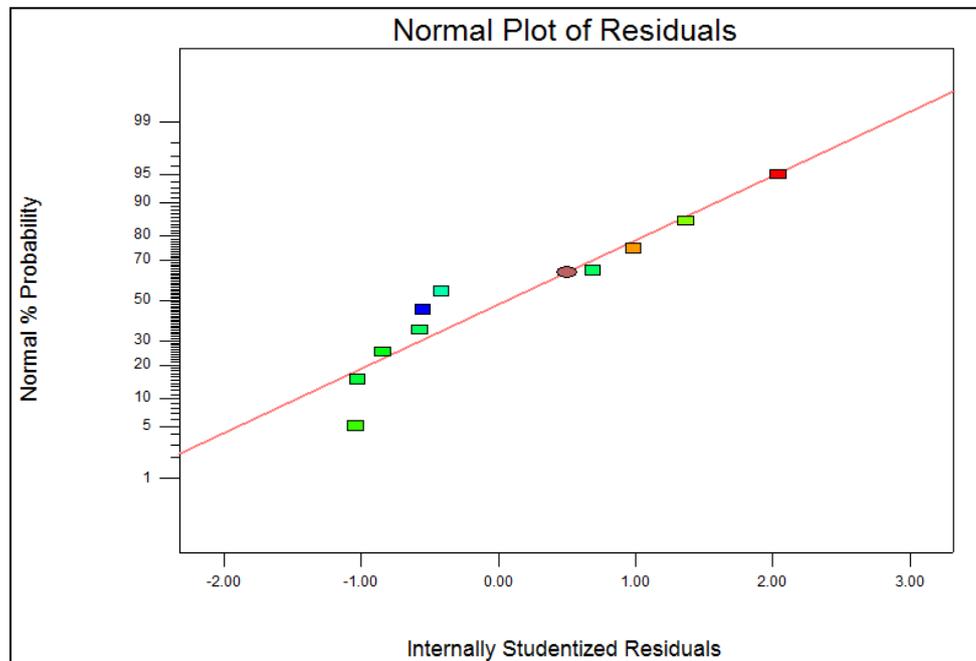
5.2.3.3.1 Análisis de la densidad de materiales con 40% de polímero

Tabla 61. Indicadores resumidos para mezclas con 40% polímero para la variable de respuesta densidad (identificación del modelo de regresión)

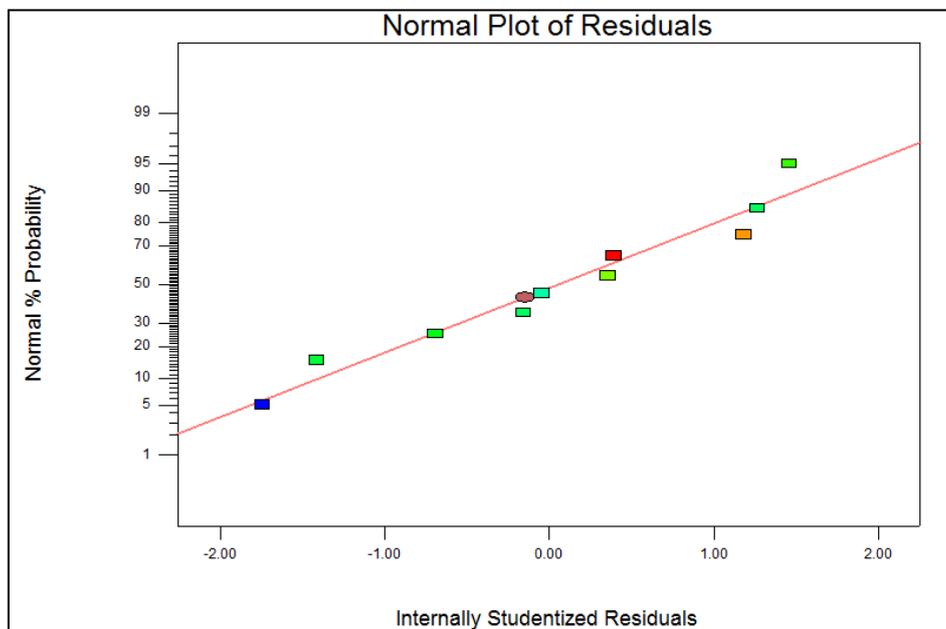
Modelo	Desviación estándar	R ² Ajustado	p-Valor	
Lineal	0.0515	0.5264	0.0303	
Cuadrático	0.0305	0.8333	0.0706	Sugerido
Cúbico especial	0.0337	0.7974	0.6272	

Explicación: vemos que la desviación estándar es menor en el modelo cuadrático, es decir, los datos se alejan menos de este modelo que de los otros, como vemos en la figura 77. El indicador R² Ajustado del modelo cuadrático se acerca más 1. Por otra parte el único p-Valor menor a 0.05 es el correspondiente al del modelo lineal. Finalmente se toma al modelo cuadrático

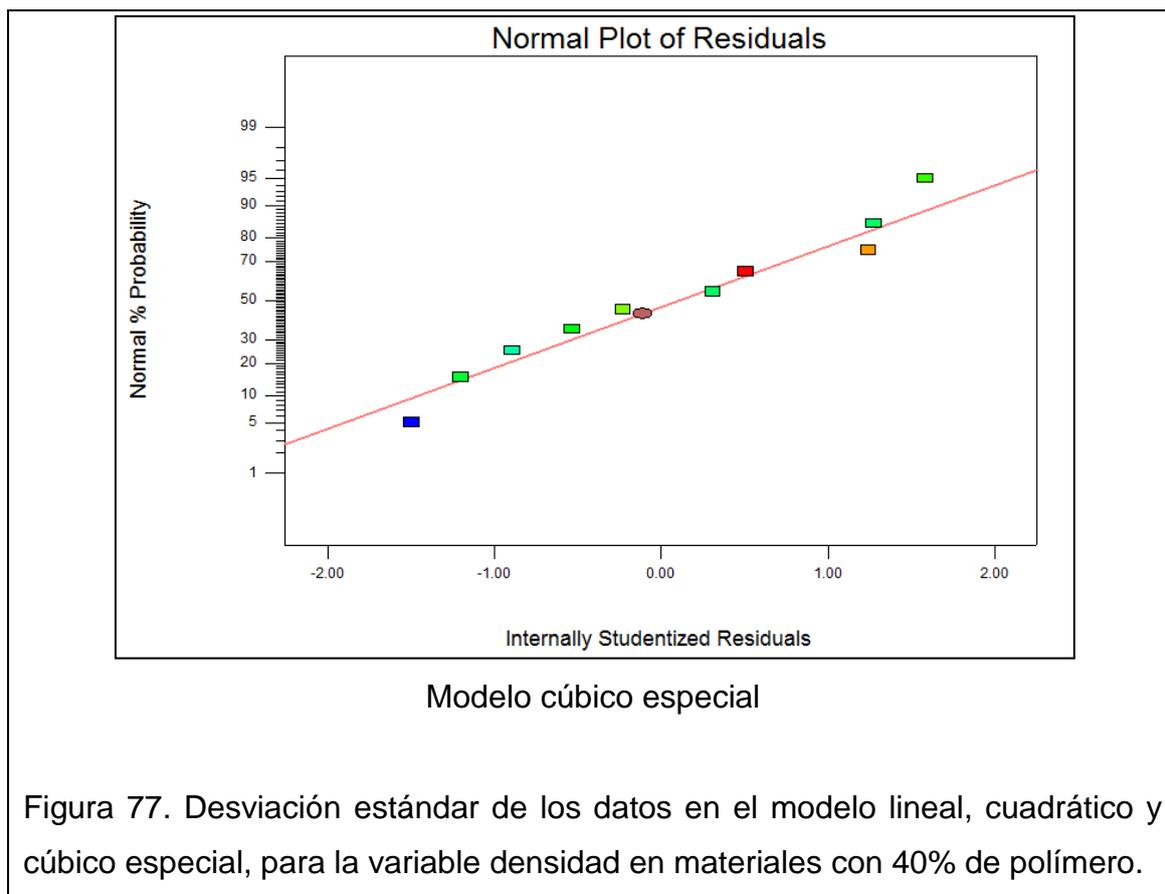
como modelo de regresión, a razón de que en dos de los tres indicadores este modelo tiene mayor concordancia con los datos.



Modelo lineal



Modelo cuadrático



El modelo que más se ajusta es el “cuadrático”, en base a este se presenta la tabla ANOVA.

Tabla 62. ANOVA para modelo de regresión cuadrático para mezclas con 40% de polímero de la variable respuesta densidad

Fuente	Suma de Cuadrados	Diferencia de cuadrados	Cuadrado Medio	Razón F	Valor-p Prob > F	
Modelo	0.0466	5	0.0093	9.9990	0.0223	Significativo
<i>Lineal</i>	0.0318	2	0.0159	17.0536	0.0110	
<i>AB</i>	0.0018	1	0.0018	1.9258	0.2375	
<i>AC</i>	0.0020	1	0.0020	2.1466	0.2168	
<i>BC</i>	0.0110	1	0.0110	11.7925	0.0264	
Error	0.0037	4	0.0009			
Total	0.0504	9				

En este caso vemos que la hipótesis nula se rechaza, al ser Valor-p < 0.05. Al rechazar la hipótesis nula, se entiende que las dosificaciones entre 40% mezcla

de polímero (PP, LDPE ó PS) con el hormigón, tienen efecto relevante sobre la densidad del material experimental.

Dado que la hipótesis nula se ha rechazado, se deben identificar que dosificaciones o mezclas influyen representativamente en la variable respuesta densidad; por lo tanto en la tabla 63 podemos apreciar el “Coeficiente estimado” y el “CI 95%”, herramientas que nos ayudan a identificar que mezclas son las más influyentes.

Tabla 63. Identificación de mezclas con 40% de polímero, influyentes en la densidad del material

Componente	Coeficiente Estimado	Error estándar	CI 95% Bajo	CI 95% Alto
A-PS	1.50	0.03	1.42	1.59
B-PP	1.71	0.03	1.63	1.79
C-LDPE	1.76	0.03	1.68	1.84
AB	0.19	0.14	-0.19	0.57
AC	-0.20	0.14	-0.58	0.18
BC	-0.47	0.14	-0.84	-0.09

Vemos que en los verdaderos rangos (CI 95%) de los componentes AB y AC pasan por cero (no significativos), por lo tanto las componentes A-PS, B-PP, C-LDPE y BC son significativas en la variable densidad.

Por otro lado vemos que el coeficiente estimado para el componente “C-LDPE” es mayor, seguido por el componente “B-PP, “A-PS” y finalmente “BC”.

Ho: Efecto de A \neq 0

Ho: Efecto de B \neq 0

Ho: Efecto de C \neq 0

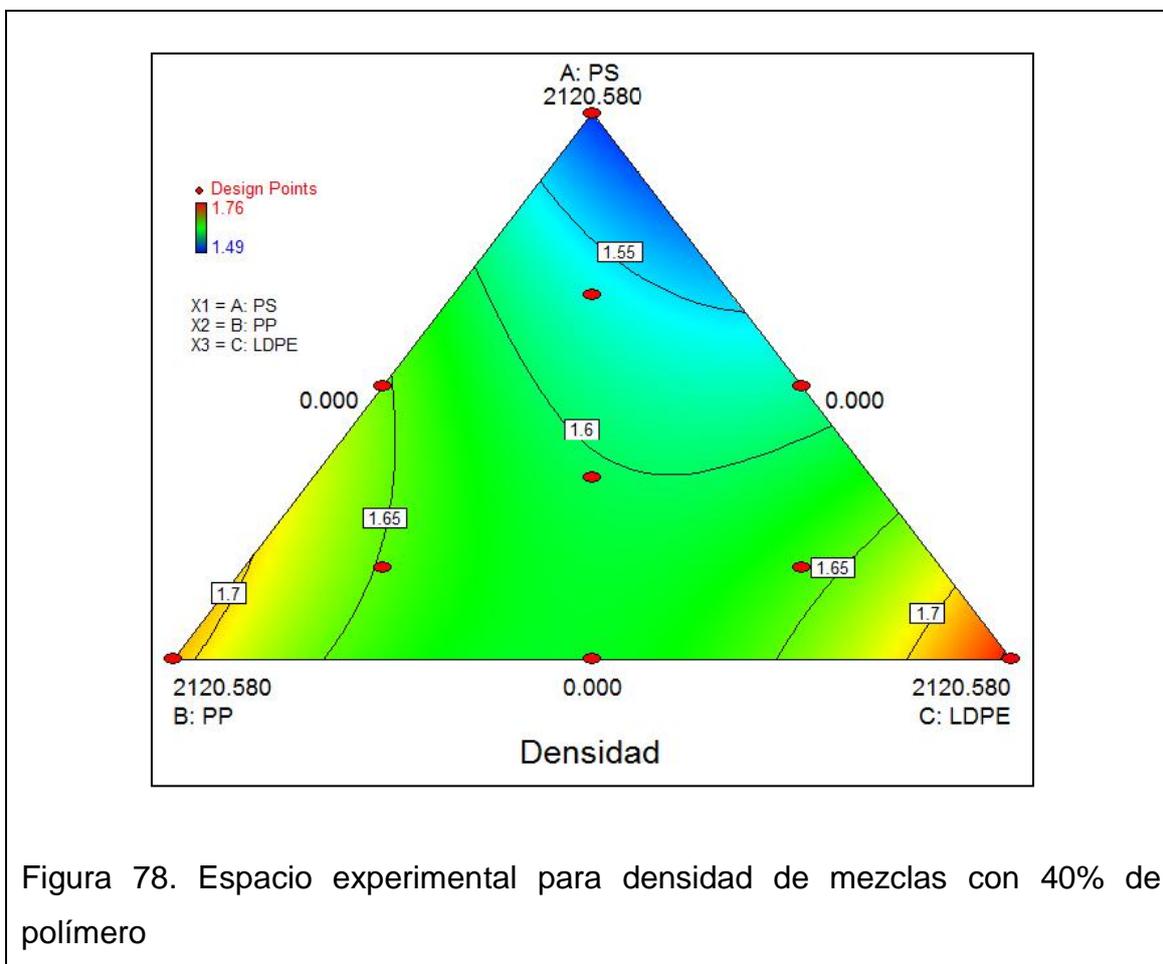
Ho: Efecto de AB=0

Ho: Efecto de AC=0

Ho: Efecto de BC \neq 0

En la figura 78 podemos apreciar el comportamiento de los componentes, siendo los influyentes positivos (aumentan la variable respuesta) los que

poseen colores de gama roja, es decir los que poseen coeficientes estimados altos; y los influyentes negativos (disminuyen la variable respuesta) los que poseen colores de gama azul, es decir los que poseen coeficientes estimados bajos.



El gráfico indica que hacia las proporciones que contienen mayor cantidad de PS la densidad del material baja (lo que se busca), en proporciones que tienden a mayor cantidad de LDPE y PP la densidad aumenta.

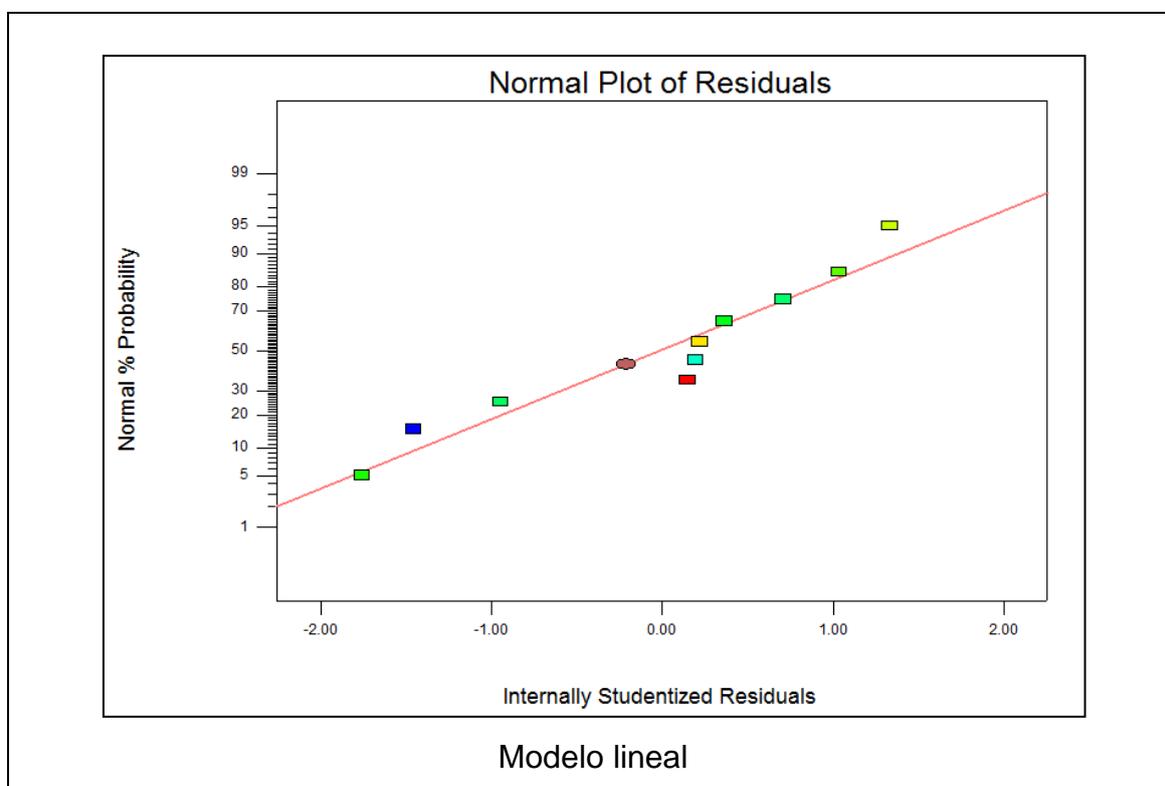
Como pudimos ver en la figura anterior, los valores oscilan densidades entre 1.49 y 1.76, recordemos que se buscan materiales entre 0.3 y 1.9 de densidad; por lo tanto todo el universo experimental es válido.

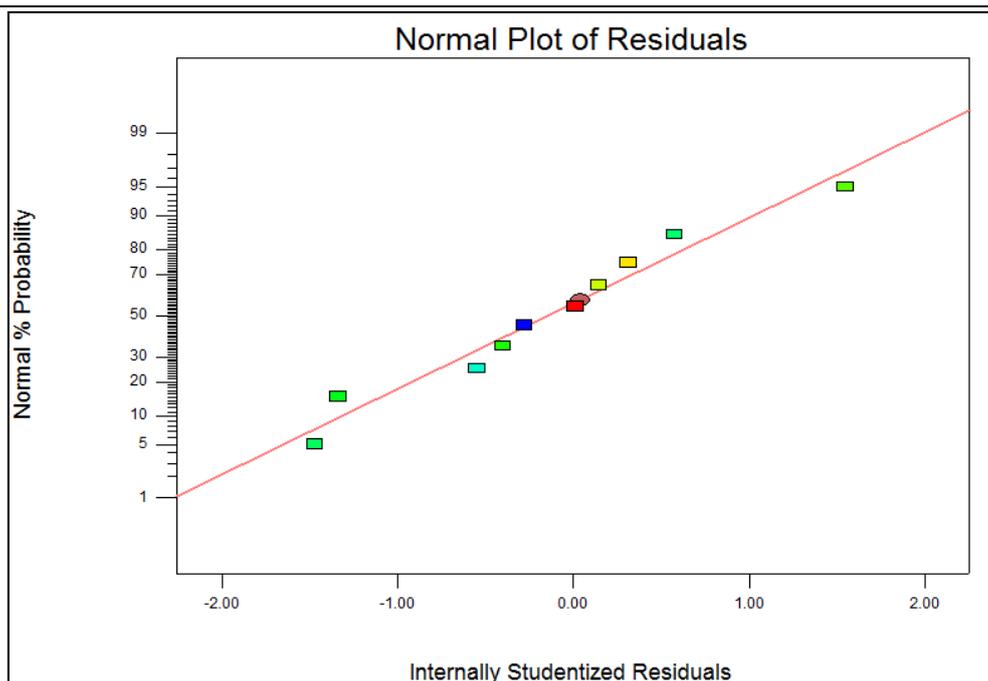
5.2.3.3.2 Análisis de la resistencia de materiales con 40% de polímero

Tabla 64. Indicadores resumidos para mezclas con 40% polímero para la variable de respuesta resistencia (identificación del modelo de regresión)

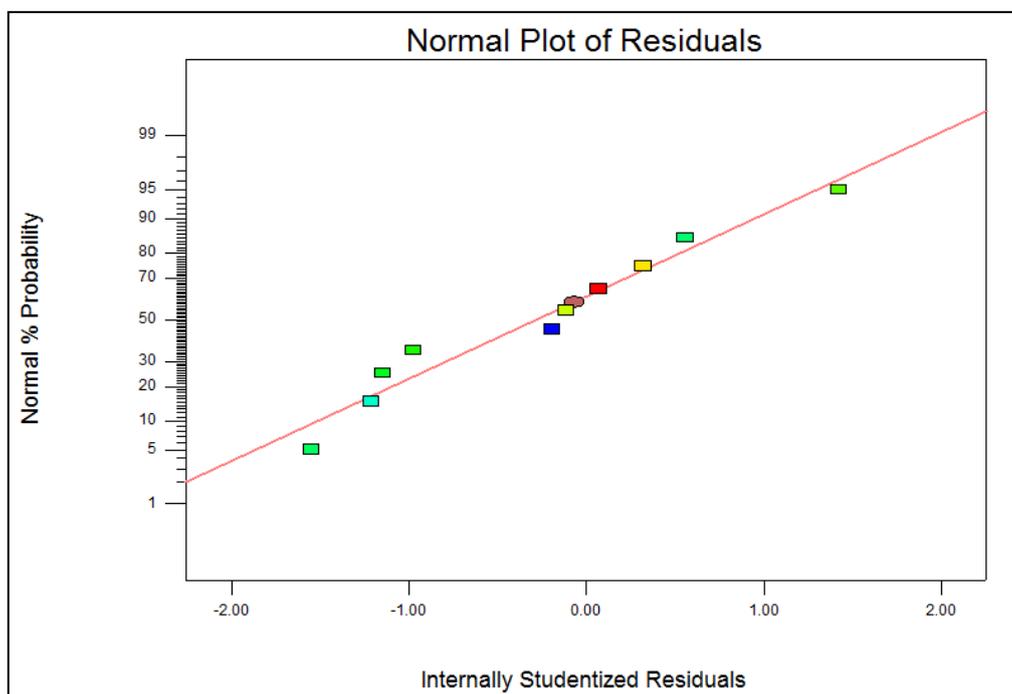
Modelo	Desviación estándar	R ² Ajustado	p-Valor	
Lineal	4.6123	0.8052	0.0014	Sugerido
Cuadrático	3.5665	0.8835	0.1921	
Cúbico especial	4.0836	0.8473	0.8355	

Explicación: vemos que la desviación estándar es menor en el modelo cuadrático, es decir, los datos se alejan menos de este modelo que de los otros, como vemos en la figura 79. El indicador R² Ajustado del modelo cuadrático se acerca más 1. El p-Valor es muy menor en el modelo lineal ($0.0014 \ll 0.05$), es decir se encuentra en la región de significancia; por este motivo Design Expert indica que el mejor modelo que describe el comportamiento de los datos es el lineal, a pesar de que en las otras dos variables (desviación estándar y R² Ajustado), no indiquen este modelo como el ideal.





Modelo cuadrático



Modelo cúbico especial

Figura 79. Desviación estándar de los datos en el modelo lineal, cuadrático y cúbico especial, para la variable resistencia en materiales con 40% de polímero

La tabla ANOVA a continuación se basa en el modelo cuadrático, modelo, que en base al p-Valor se ajusta más los datos de la experimentación.

Tabla 65. ANOVA para modelo de regresión lineal para mezclas con 40% de polímero de la variable respuesta resistencia

Fuente	Suma de Cuadrados	Diferencia de cuadrados	Cuadrado Medio	Razón F	Valor-p Prob > F	
Modelo	834.1111	2	417.0556	19.6045	0.0014	Significativo
<i>Lineal</i>	834.1111	2	417.0556	19.6045	0.0014	
Error	148.9139	7	21.2734			
Total	983.0250	9				

En este caso vemos que la hipótesis nula se rechaza, al ser Valor-p < 0.05. Al rechazar la hipótesis nula, se entiende que las dosificaciones entre 40% mezcla de polímero (PP, LDPE ó PS) con el hormigón, tienen efecto relevante sobre la resistencia del material experimental.

Dado que la hipótesis nula se ha rechazado, se deben identificar que dosificaciones o mezclas influyen representativamente en la variable respuesta resistencia; por lo tanto en la tabla 66 podemos apreciar el “Coeficiente estimado” y “el CI 95%”, herramientas que nos ayudan a identificar que mezclas son las más influyentes.

Tabla 66. Identificación de mezclas con 40% de polímero, influyentes en la densidad del material

Componente	Coeficiente Estimado	Error estándar	CI 95% Bajo	CI 95% Alto
A-PS	11.04	3.40	2.99	19.09
B-PP	44.04	3.40	35.99	52.09
C-PELD	23.37	3.40	15.32	31.42

Vemos que ninguno de los verdaderos rangos de los componentes (CI 95%) pasa por cero, por lo tanto todos los componentes presentados son significativos. Por otro lado vemos que el coeficiente estimado para el

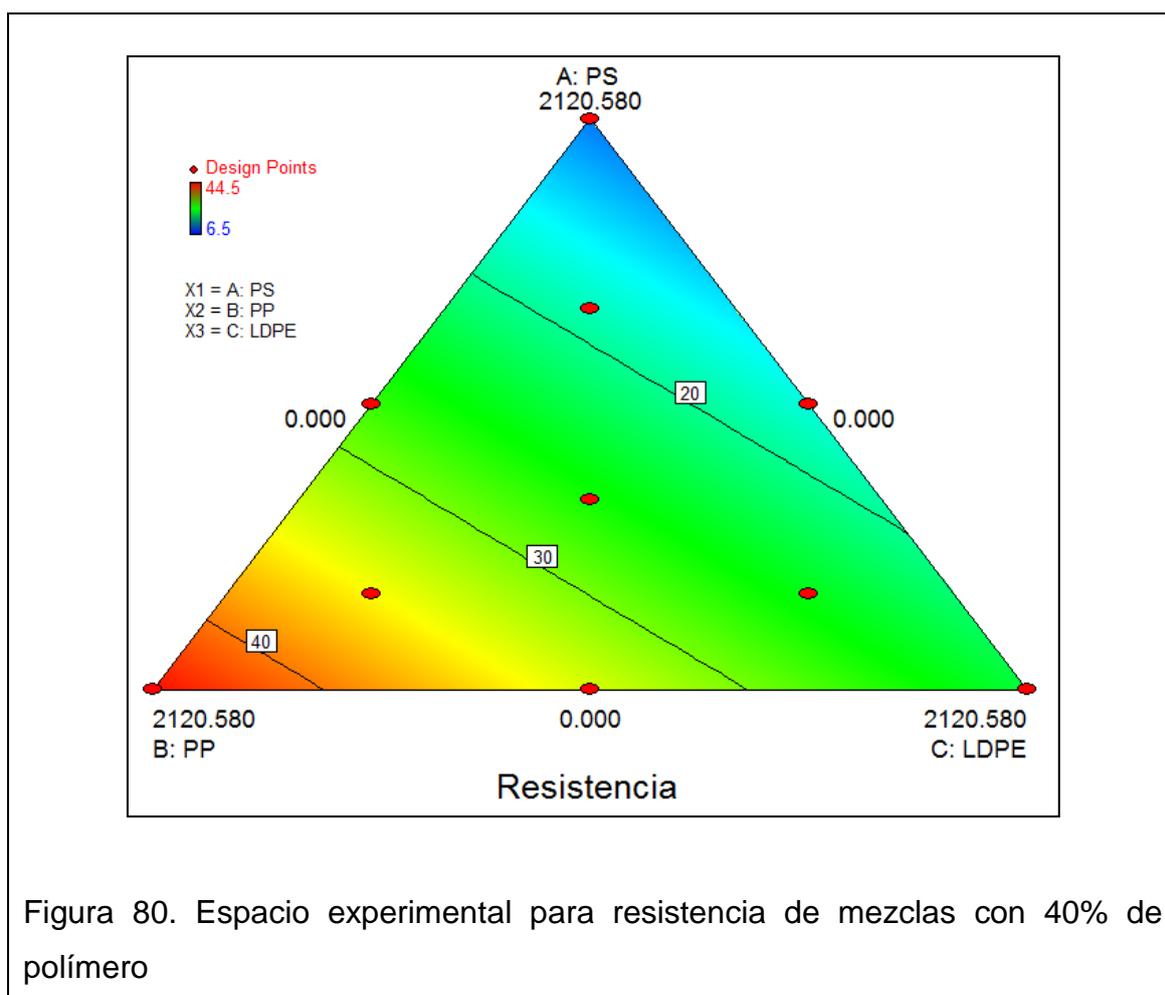
componente “B-PP” es mayor, seguido por el componente “C-LDPE” y finalmente “A-PS”.

Ho: Efecto de A≠0

Ho: Efecto de B≠0

Ho: Efecto de C≠0

En la figura 80 podemos apreciar el comportamiento de los componentes, siendo los influyentes positivos (aumentan la variable respuesta) los que poseen colores de gama roja, es decir los que poseen coeficientes estimados altos; y los influyentes negativos (disminuyen la variable respuesta) los que poseen colores de gama azul, es decir los que poseen coeficientes estimados bajos.

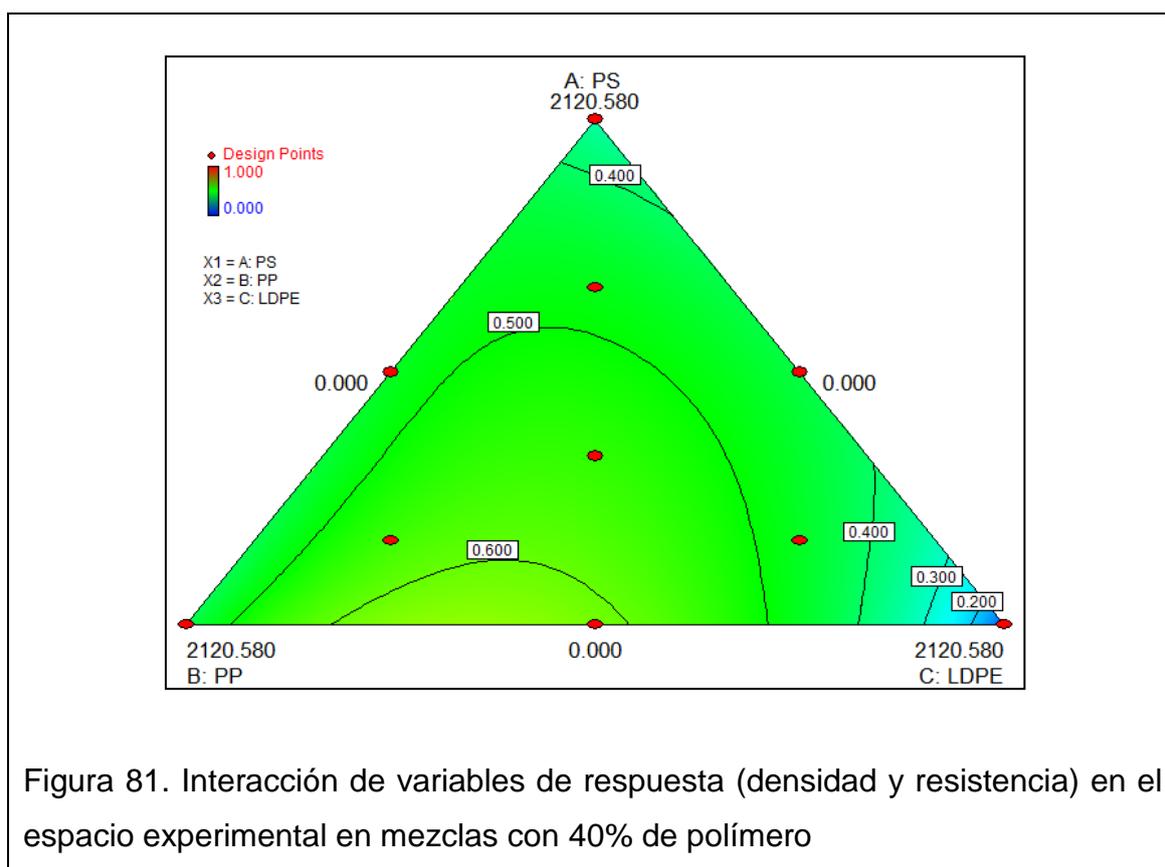


En proporciones que tienden a dosis altas o totales de PP la resistencia aumenta (lo que se busca), y en proporciones a valores que tienden hacia PS la resistencia disminuye.

Vemos que las resistencias oscilan entre 6.5 y 44.5 kg/cm², en este caso todo el universo experimental cae dentro de los límites de los hormigones alivianados (7.14 a 173.35 kg/cm²).

5.2.3.3.3 Resumen de materiales con 40% polímero.

En la siguiente gráfica se puede apreciar las zonas donde tanto la densidad como la resistencia tienen coincidencia en los límites de los hormigones livianos y los mejores valores para los materiales buscados (máxima resistencia, mínima densidad).



Como pudimos analizar anteriormente, los componentes que influyen en esta superficie son los puntos de dosificación conocidos como: A, B, C, y BC. En la gráfica vemos que las dosis de polímeros donde se obtiene una máxima

resistencia y una mínima densidad tienden a estar entre la mitad de la dosificación de PP y LDPE (BC), y la dosificación máxima de PP (B). Por lo tanto que en materiales con 40% de polímero, las dosificaciones para alcanzar materiales aceptables son amplias, ero con límites inferiores a los materiales con 30% de polímero.

5.3 Análisis de beneficios ambientales (identificación de materiales óptimos)

Para conocer las ventajas ambientales, es de suma importancia identificar las mezclas con mejores resultados que se han obtenido, es decir, mezclas de materiales que tengan mínima densidad con máxima resistencia.

Basándose en los resultados obtenidos de las mezclas con 30 y 40% de polímero se han establecido las siguientes áreas como óptimas

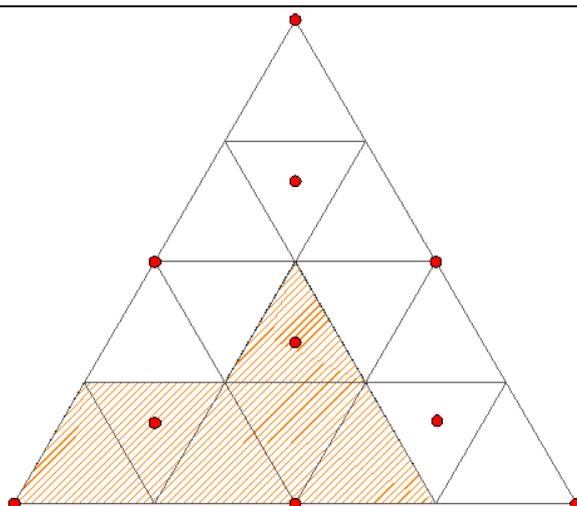


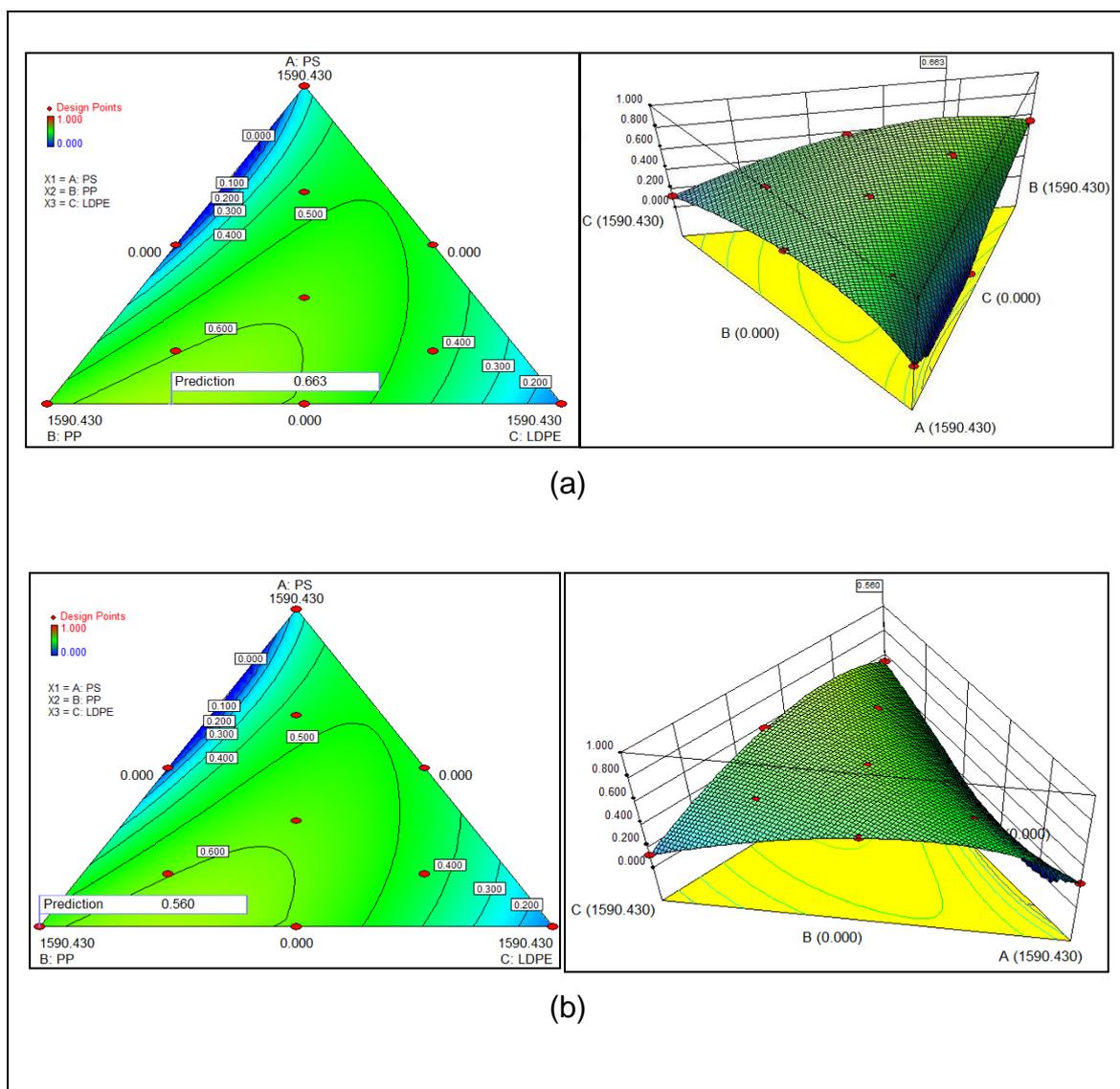
Figura 82. Áreas con mejor incidencia en las variables de estudio (densidad y resistencia)

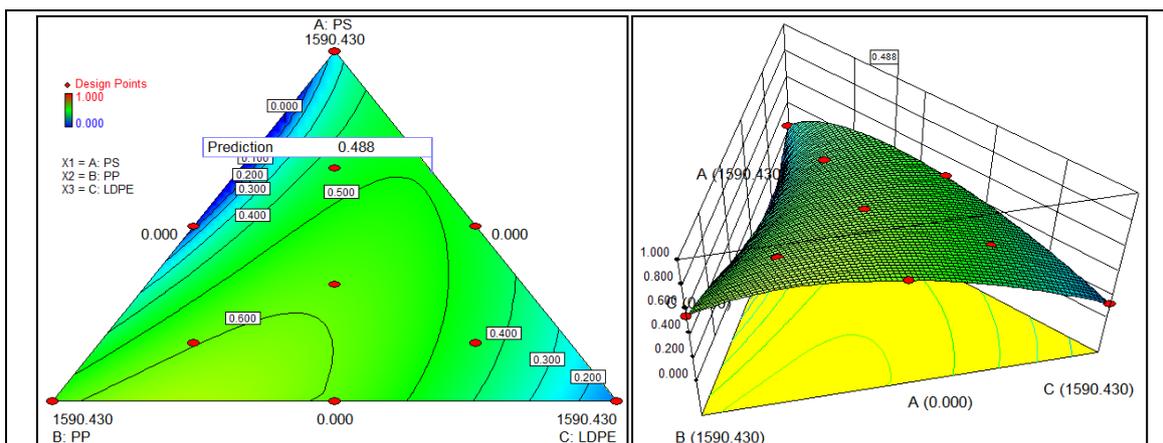
Explicación: los puntos rojos representan las muestras experimentadas, el área sombreada indica las zonas donde se obtuvieron mejores resultados para las variables densidad (mínima) y resistencia (máxima).

De manera más puntual, a continuación se indicarán las dosificaciones que generaron mejores resultados, tanto en materiales con 30% de polímero como con 40% de polímero.

5.3.1 Dosis óptimas para materiales con 30% de polímero

Se han establecido tres dosificaciones como óptimas dentro de este universo experimental. En la figura 83 se indican los puntos donde se encuentran los materiales más útiles para la investigación, es decir materiales análogos a hormigones alivianados.





(c)

Los puntos señalados en el universo experimental antes expuesto indican las zonas donde se tiene probabilidades de encontrar un material óptimo, siendo este aquel que tiende a 1.

- (a) dosificación óptima de materiales con 30% de polímero
- (b) segunda dosificación óptima de materiales con 30% de polímero
- (c) última dosificación óptima de materiales con 30% de polímero

Figura 83. Puntos más óptimos en el universo experimental 30% de polímero

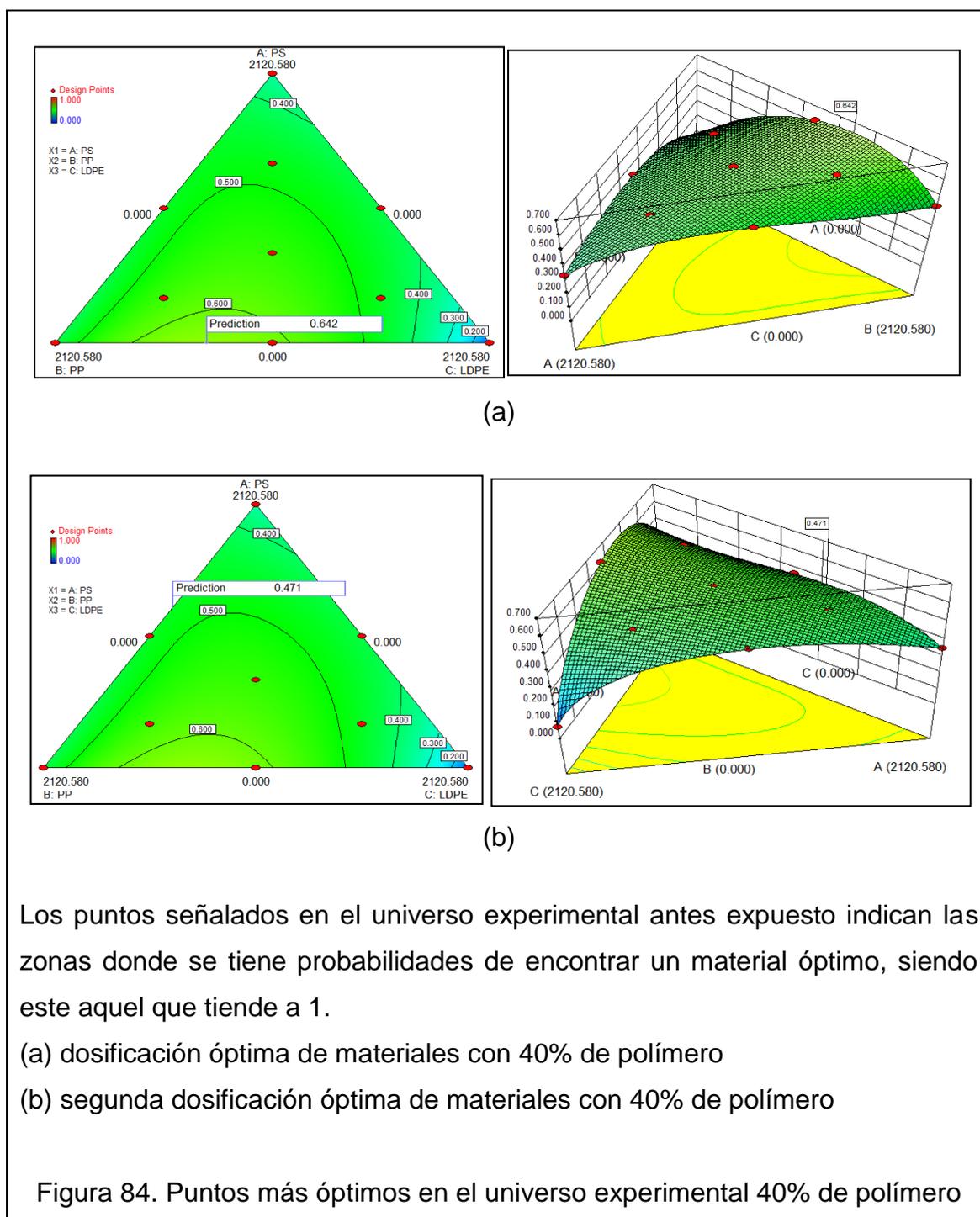
En la tabla a continuación se aprecian las dosificaciones de polímero con mejores resultados para materiales con 30% de desecho plástico.

Tabla 67. Mezclas óptimas para hormigones de baja densidad con 30% de polímero

MATERIAL	PS [cm ³]	PP [cm ³]	LDPE [cm ³]	Densidad [gr/cm ³]	Resistencia [kg/cm ²]	Probabilidad de material óptimo
1	0.00	1206.21	384.22	1.85	56.94	0.663
2	0.00	1590.43	0.00	1.83	46.37	0.560
3	1042.72	0.00	547.71	1.83	43.33	0.488

5.3.2 Dosis óptimas para materiales con 40% de polímero

Se han establecido dos dosificaciones como óptimas dentro de este universo experimental. En la figura 84 se indican los puntos donde se encuentran los materiales más útiles para la investigación, es decir materiales análogos a hormigones alivianados.



En la tabla a continuación se aprecian las dosificaciones de polímero con mejores resultados para materiales con 40% de desecho plástico.

Tabla 68. Mezclas óptimas para hormigones de baja densidad con 30% de polímero

MATERIAL	PS [cm ³]	PP [cm ³]	LDPE [cm ³]	Densidad [gr/cm ³]	Resistencia [kg/cm ²]	Probabilidad de material óptimo
4	0.00	1381.30	739.28	1.62	36.83	0.642
5	1295.52	825.06	0.00	1.63	23.88	0.471

Tanto en las dosis óptimas de materiales con 30% de polímero como en materiales con 40% de polímero, los resultados de densidad y resistencia se encuentran dentro de los límites establecidos para hormigones de baja densidad, es decir, 0.3 a 1.9 gr/cm³ para densidad y 7.14 a 173.35 kg/cm² para resistencia.

5.3.3 Valoración ambiental y estructural de los materiales estudiados

Todos los materiales óptimos son:

Tabla 69. Mezclas con mejores resultados de la experimentación (mínima densidad, máxima resistencia)

% de Polímero	MATERIAL	PS [cm ³]	PP [cm ³]	LDPE [cm ³]	Densidad [gr/cm ³]	Resistencia [kg/cm ²]
30%	1	0	1206.21	384.22	1.85	56.94
	2	0	1590.43	0	1.83	46.37
	3	1042.721	0	547.709	1.83	43.33
40%	4	0	1381.296	739.284	1.62	36.83
	5	1295.523	825.057	0	1.63	23.88

5.3.3.1 Requisitos para la valoración ambiental

Para identificar las ventajas ambientales de estos materiales es necesario conocer la cantidad de desecho que se ocuparía y la cantidad de CO₂ que se evitaría por cada metro cúbico de material fabricado.

5.3.3.1.1 Parámetros para identificar desecho reciclado por cada metro cúbico de material fabricado

El parámetro primordial para entender que cantidad de desecho se recicla es la densidad de los desechos ocupados.

En la tabla 70 podemos ver las densidades obtenidas de los polímeros; los análisis se hicieron en los laboratorios de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Agropecuarias (FICA) de la Universidad de las Américas.

Tabla 70. Densidad de los polímeros utilizados en la experimentación

POLÍMERO	gr/cm ³
PS	0.03
PP	0.96
LDPE	0.93

5.3.3.1.2 Parámetros para identificar la cantidad de CO₂ evitado por cada metro cúbico de material fabricado

Para entender los beneficios ambientales con respecto a la disminución de CO₂ del cemento, es conveniente comparar los materiales experimentales con hormigones ligeros convencionales que entreguen similares características; por este motivo, a continuación en la tabla 71, se presentan los diseños de hormigones ligeros de agregado liviano de poliestireno.

Tabla 71. Diseño para 1 m³ de hormigones livianos convencionales de poliestireno

Cemento [kg]	Arena [kg]	Agua [kg]	Poliestireno expandido [kg]	Aditivo aglutinante [kg]	Densidad [gr/cm ³]	Resistencia [kg/cm ²]
320	142	138	12.5	2	600	14
320	239	141	12	2	700	20
320	336	144	11	2	800	23
330	415	155	10.5	2	900	33
330	508	162	10	---	1000	38
330	598	172	9.5	---	1100	48
330	695	175	9	---	1200	59

Tomado de: Ordoñez Pinargote L., Baquerizo Cruz J., Del Pezo Reyes N., 2012, p. 4.

Se conoce que se generan 633 kg de CO₂ por cada tonelada de cemento fabricado

5.3.3.2 Ventajas ambientales de los materiales óptimos dimensionados

En la tabla 72 podemos observar la cantidad de desecho ocupado por cada metro cúbico de material, su densidad, resistencia, cantidad de cemento utilizado, cantidad de cemento utilizado en hormigones análogos en resistencia (según tabla 71), cantidad de cemento evitado y cantidad de CO₂ evitado.

Tabla 72. Resultados ambientales de los materiales fabricados

	DESECHO RECICLADO [kg]	Densidad [gr/cm ³]	Resistencia [kg/cm ²]	Cemento ocupado [kg]	Cemento hormigón análogo [kg]	Diferencia de cemento [kg]	CO ₂ evitado [kg]
1	285.2468	1.85	56.94	235.80	330.00	94.20	59.34
2	287.6571	1.83	46.37	235.80	330.00	94.20	59.34
3	100.8391	1.83	43.33	235.80	330.00	94.20	59.34
4	378.9052	1.62	36.83	201.85	330.00	128.15	80.74
5	155.7014	1.63	23.88	201.85	320.00	118.15	74.44

Tabla 73. Resumen de resultados ambientales

POLÍMERO	MATERIAL	Densidad [gr/cm ³]	Resistencia [kg/cm ²]	DESECHO RECICLADO [kg]	CO ₂ evitado [kg]
30%	1	1.85	56.94	285.2468	59.34
	2	1.83	46.37	287.6571	59.34
	3	1.83	43.33	100.8391	59.34
40%	4	1.62	36.83	378.9052	80.74
	5	1.63	23.88	155.7014	74.44

Para indicar que material es el más óptimo en el carácter ambiental, en las figuras 85 y 86 se aprecian las ventajas ambientales que estos materiales

supondrían, y en la figura 87 sus características estructurales (densidad y resistencia).

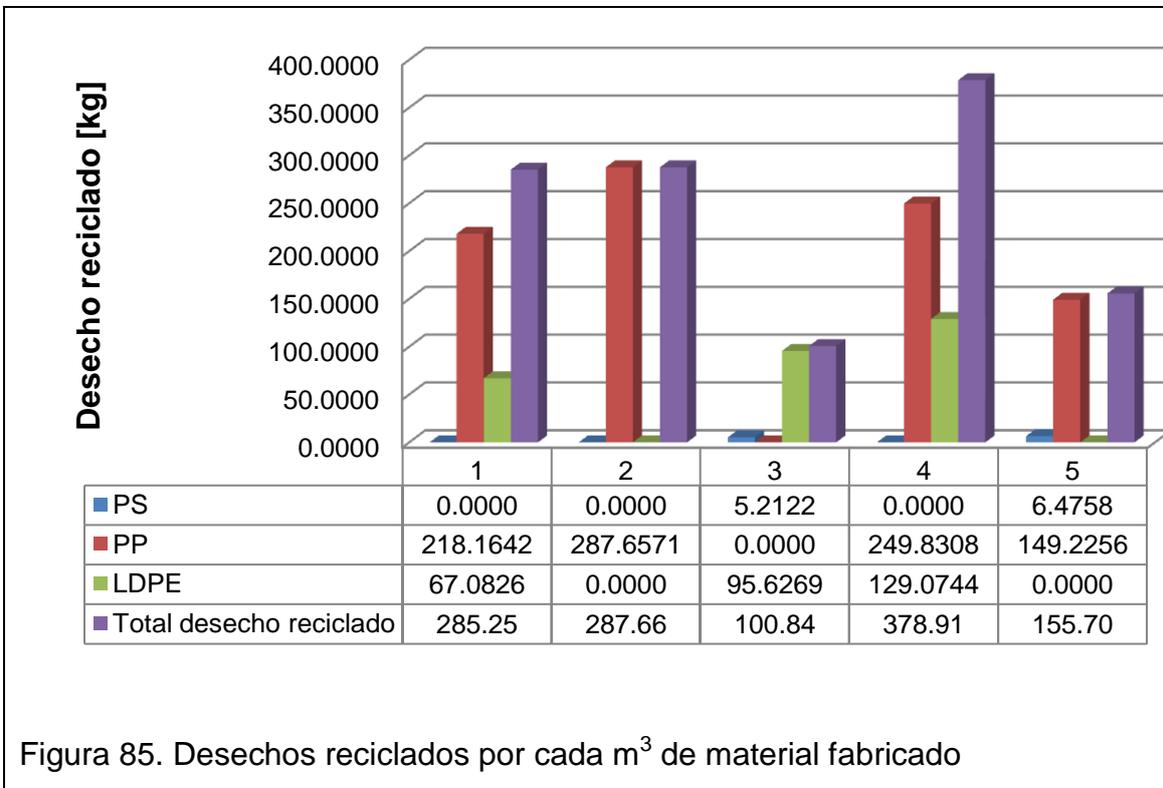


Figura 85. Desechos reciclados por cada m³ de material fabricado

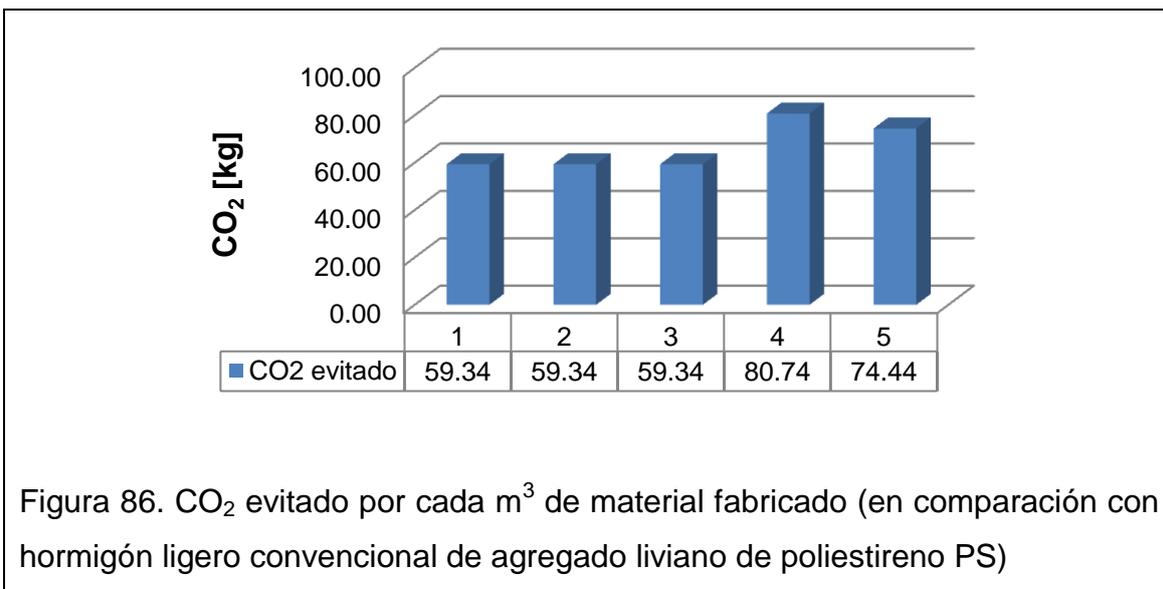
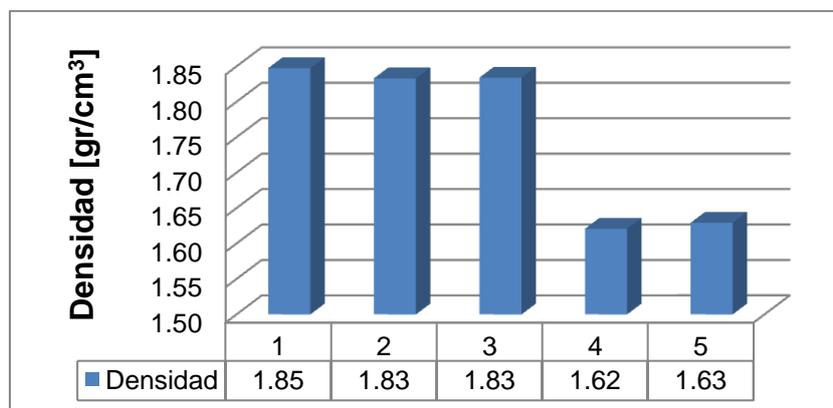
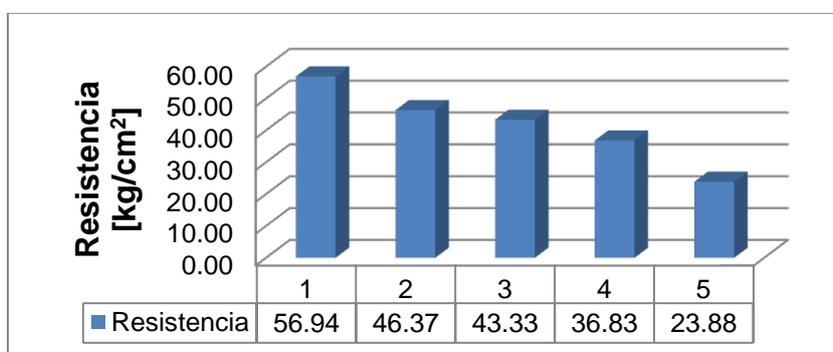


Figura 86. CO₂ evitado por cada m³ de material fabricado (en comparación con hormigón ligero convencional de agregado liviano de poliestireno PS)



(a)



(b)

(a) densidades de los materiales óptimos

(b) resistencias de los materiales óptimos

Figura 87. Parámetros de densidad y resistencia de los materiales finales.

5.3.3.3 Identificación del material óptimo

Se pudo comprobar para este trabajo de titulación que existen 5 materiales que pueden considerarse análogos a hormigones alivianados, que en su composición albergan desechos reciclables, y a su vez, al compararlos con hormigones alivianados de agregados ligeros (poliestireno), existe una disminución de CO₂ emanado por el uso de cemento.

Para elegir el material con mayor importancia se ocuparán las fórmulas 7 y 8, sobre ponderación de materiales, obteniendo así la importancia de los materiales.

Tabla 74. Obtención del coeficiente de variación CV ($CV=V/DS$) de cada variable de cada material óptimo

		Densidad			Resistencia			Desecho reciclado			CO ₂ evitado		
		V1 [gr/cm ³]	DS1 [gr/cm ³]	CV1	V2 [kg/cm ²]	DS2 [kg/cm ²]	CV2	V3 [kg]	DS3 [kg]	CV3	V4 [kg]	DS4 [kg]	CV4
MATERIAL	1	1.85	0.12	15.91	56.94	12.22	4.66	285.25	111.89	2.55	59.34	10.24	5.79
	2	1.83	0.12	15.74	46.37	12.22	3.79	287.66	111.89	2.57	59.34	10.24	5.79
	3	1.83	0.12	15.74	43.33	12.22	3.54	100.84	111.89	0.90	59.34	10.24	5.79
	4	1.62	0.12	13.93	36.83	12.22	3.01	378.91	111.89	3.39	80.74	10.24	7.88
	5	1.63	0.12	14.02	23.88	12.22	1.95	155.70	111.89	1.39	74.44	10.24	7.27

Tabla 75. Importancia de los materiales óptimos

$$(M=CV1P1+CV2P2+CV3P3+CV4P4)$$

		Densidad			Resistencia			Desecho reciclado			CO ₂ evitado			M
		CV1	P1	CV1*P1	CV2	P2	CV2*P2	CV3	P3	CV3*P3	CV4	P4	CV4*P4	
MATERIAL	1	15.91	0.10	1.59	4.66	0.20	0.93	2.55	0.40	1.02	5.79	0.30	1.74	5.28
	2	15.74	0.10	1.57	3.79	0.20	0.76	2.57	0.40	1.03	5.79	0.30	1.74	5.10
	3	15.74	0.10	1.57	3.54	0.20	0.71	0.90	0.40	0.36	5.79	0.30	1.74	4.38
	4	13.93	0.10	1.39	3.01	0.20	0.60	3.39	0.40	1.35	7.88	0.30	2.37	5.72
	5	14.02	0.10	1.40	1.95	0.20	0.39	1.39	0.40	0.56	7.27	0.30	2.18	4.53

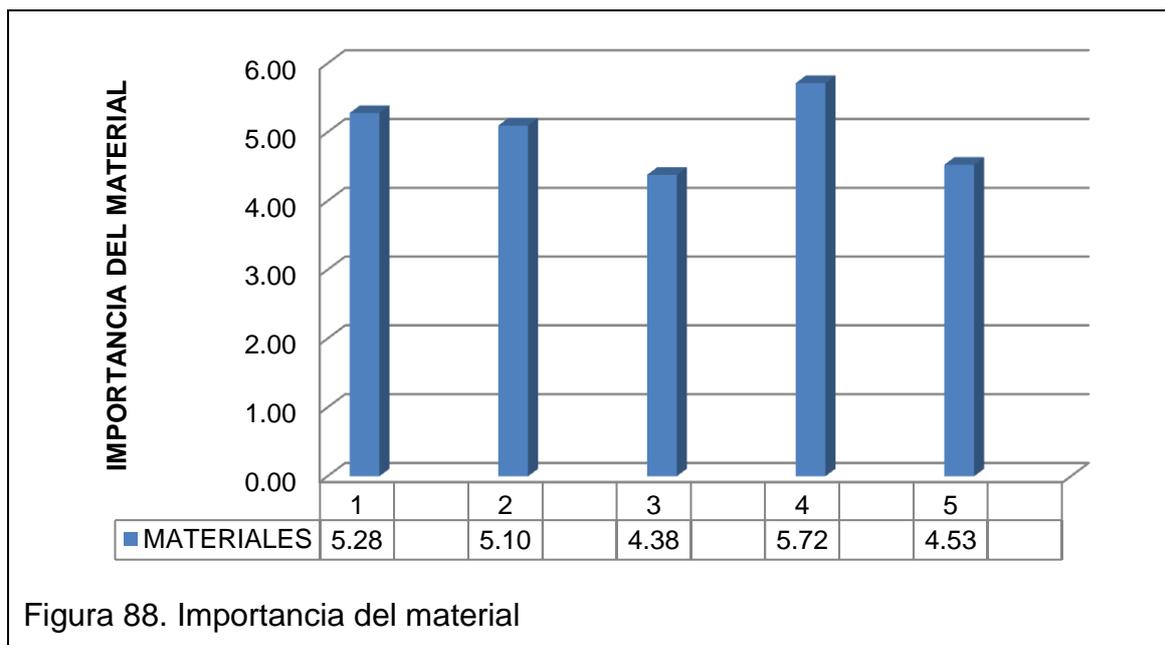


Figura 88. Importancia del material

Podemos concluir indicando que los materiales de mejor respuesta, en orden de importancia son: Material 4, material 1 y material 2.

5.4 Análisis costo beneficio

5.4.1 Costo de agregados, cemento, polímeros reciclables y agua

Tabla 76. Costos de componentes de materiales de materiales experimentales desarrollados y de hormigón alivianado con poliestireno

COMPONENTE	USD/kg
Piedra $\frac{3}{4}$ (67)	0.0108
Arena	0.0062
Cemento	0.1536
Agua	0.0007
PS Triturado	0.8000
PP Pelletizado	1.0000
LDPE Pelletizado	1.0000

Explicación: el costo de los agregados se refiere al costo de ellos de la cantera de Holcim S.A. de Pifo; el costo del cemento es del producto “Selvalegre Plus”; el costo del agua se refiere al indicado para la actividad industrial en Quito; los costos de los polímeros dispuestos para el reciclaje es tomado del gestor ambiental tecnificado “M y S Reciclajes”.

5.4.2 Costos de materiales experimentales óptimos

Este análisis se realizará a los materiales 4 y 1, materiales con mejores respuestas.

Tabla 77. Costo de 1 m³ del material 4 (material compuesto por 40% de polímero y 60% de hormigón de 210 en relación volumétrica)

	COMPONENTE	[Kg]	\$/kg	Costo [USD]
HORMIGÓN	Piedra ¾ (67)	537.63	0.01	5.81
	Arena	433.88	0.01	2.71
	Cemento	201.85	0.15	31.00
	Agua	122.62	0.00	0.09
POLÍMERO	PS Triturado	0.00	0.80	0.00
	PP Pelletizado	249.83	1.00	249.83
	LDPE Pelletizado	129.07	1.00	129.07
COSTO TOTAL				418.51

Tabla 78. Costo de 1 m³ del material 1 (material compuesto por 30% de polímero y 70% de hormigón de 210 en relación volumétrica)

	COMPONENTE	[Kg]	\$/kg	Costo [USD]
HORMIGÓN	Piedra ¾ (67)	626.30	0.01	6.76
	Arena	505.56	0.01	3.15
	Cemento	235.80	0.15	36.22
	Agua	141.48	0.00	0.10
POLÍMERO	PS Triturado	0.00	0.80	0.00
	PP Pelletizado	218.16	1.00	218.16
	LDPE Pelletizado	67.08	1.00	67.08
COSTO TOTAL				331.48

5.4.3 Costo de hormigones ligeros análogos a los materiales óptimos

Tabla 79. Costo de 1 m³ de hormigón ligero de agregado de poliestireno convencional análogo al material 4 (material compuesto por 40% de polímero y 60% de hormigón de 210 en relación volumétrica)

COMPONENTE	[Kg]	\$/kg	Costo [USD]
Arena	598.00	0.01	3.73
Cemento	330.00	0.15	50.69
Agua	162.00	0.00	0.12
PS	10.00	0.80	8.00
COSTO TOTAL			62.54

Tabla 80. Costo de 1 m³ de hormigón ligero de agregado de poliestireno convencional análogo al material 1 (material compuesto por 30% de polímero y 60% de hormigón de 210 en relación volumétrica)

COMPONENTE	[Kg]	\$/kg	Costo [USD]
Arena	695.00	0.01	4.34
Cemento	330.00	0.15	50.69
Agua	175.00	0.00	0.13
PS	9.00	0.80	7.20
COSTO TOTAL			62.35

5.4.4 Identificación, cuantificación y valoración de los beneficios ambientales

5.4.4.1 Disminución de desechos sintéticos en rellenos sanitarios

Los materiales determinados como óptimos indican una capacidad considerable en el reciclaje de desechos; el material 4 al tener en su composición 40% de desecho plástico (PP y LDPE), por cada m³ que se fabrique de él, se van a ocupar hasta 378.91 kg de desecho plástico. El material 1 al estar compuesto de hasta un 30% de desecho (PP y LDPE), por cada m³ que se fabrique de él, se van a ocupar hasta 285.25 kg de desecho plástico.

Tomando en cuenta las características técnicas de los materiales investigados se ha determinado usos que son análogos a los de hormigones ligeros; una de sus aplicaciones más habitual es en forma de mampuestos no portantes (ladrillos, bloques, adoquines que no resisten cargas altas); el tiempo de vida útil de estos elementos de construcción es indeterminado, ya que dejan de ser útiles cuando la edificación es derrumbada, haciéndonos entender que al ocupar estos desechos se está eliminando un pasivo ambiental de manera definitiva.

Para entender desde un aspecto económico las ventajas ambientales, se tomará el valor de costo por tonelada de manejo de desecho indicada por EMASEO aceptado desde el año 2010, siendo este de 21.07 USD; este costo considera los costos de la gestión de desechos en Quito, es decir, desde su transporte hasta su confinación o disposición final en el relleno sanitario (EMASEO, Agencia de Noticias, 2013, párr. 3). El costo de manejo puede ser caracterizado en base a los desechos que la ciudad genera, según la tabla 1 vemos que el porcentaje de desecho de polipropileno (PP) y de polietileno de baja densidad (LDPE) que la ciudad genera anualmente es del 1.65% y 5.99% respectivamente (desechos utilizados en los materiales óptimos), por lo tanto el costo para manejar cada tonelada de desecho de PP y de LDPE es de 0.35 y 1.26USD/Ton de desecho respectivamente en el relleno sanitario del DMQ.

Tabla 81. Costos de gestión de desechos en el DMQ evitados por el uso de desecho en cada m³ de los materiales óptimos establecidos de esta investigación

	Desecho	Desecho ocupado [ton]	Costo manejo de desecho [USD/ton]	Costo Evitado [USD]	Total evitado [USD]
Material 4	PP	0.25	0.35	0.09	0.25
	LDPE	0.13	1.26	0.16	
Material 1	PP	0.22	0.35	0.08	0.16
	LDPE	0.07	1.26	0.08	

Explicación: el costo evitado del material 1 y del material 4 por cada m³ fabricado es de 0.25 y 0.16 USD respectivamente.

5.4.4.2 Mitigación de CO₂ de la actividad cementera

Ecofys, consultora de energética, indica que remediar el CO₂ emanado por la actividad cementera tiene un costo promedio de 37.88\$ por tonelada de CO₂ (Hendriks C. y Graus W., 2002, p.11). En base a esta tasa podemos indicar los costos que implican la utilización de los materiales aquí investigados y sus respectivos análogos (hormigones ligeros de agregado fino de poliestireno).

Tabla 82. Costo para remediar CO₂ del cemento ocupado para la fabricación de 1 m³ de material 4 y su hormigón ligero análogo, y costo evitado de remediación de material 4.

	Remediación CO ₂ [USD]
Material 4	7.65
Hormigón ligero análogo	12.5
Costo evitado [USD]	4.85

Tabla 83. Costo para remediar CO₂ del cemento ocupado para la fabricación de 1 m³ de material 1 y su hormigón ligero análogo, y costo evitado de remediación de material 1.

	Remediación CO ₂ [USD]
Material 1	8.93
Hormigón ligero análogo	12.5
Costo evitado [USD]	3.57

Vemos que tanto en el material 4 con en el material 1, al comparar sus cantidades de CO₂ para remediar, existe una diferencia positiva para los materiales 4 y 1.

5.4.5 Resumen del análisis costo beneficio

En este apartado se describe que costo conlleva fabricar los materiales óptimos y que beneficio ambiental cuantificado en dólares tienen. Finalmente se hará una comparación económica de los materiales análogos convencionales con los materiales aquí investigados.

Tabla 84. Costo de la fabricación de 1 m³ de los materiales óptimos y su beneficio ambiental (disminución de CO₂ del cemento y disminución de tratamiento de desechos en rellenos sanitarios)

MATERIAL ÓPTIMO	Costo de fabricación [USD]	Beneficio Ambiental		Costo final [USD]
		Reducción de CO ₂ del cemento [USD]	Reducción del manejo de desechos [USD]	
Material 4	418.51	4.85	0.25	413.41
Material 1	331.48	3.57	0.16	327.75

Tabla 85. Comparación de los costos de materiales análogos y materiales experimentales.

MATERIAL	Costo [USD]	Diferencia [USD]
Material 4	413.41	-350.87
Hormigón análogo convencional	62.54	
Material 1	327.75	-265.40
Hormigón análogo convencional	62.35	

Vemos que a pesar de tener un beneficio ambiental los materiales experimentales (beneficio medido en dólares) el costo de ellos en comparación a sus análogos ocupados normalmente, es considerablemente mayor.

III. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Existen 5 polímeros de desecho en Quito, ellos son PET, PS, PP, LDPE y HDPE, existiendo mayor problemática con el PS (poliestireno) ya que se recicla en menor cantidad por los gestores ambientales. Se estima 5000 toneladas de PS de residuo y se reciclan un máximo de 29 toneladas anualmente.
- La accesibilidad a los desechos por medio de gestores ambientales es amplia hacia los siguientes polímeros: LDPE, PP y PS. Los otros polímeros son de difícil accesibilidad por cantidad de cobertura de recolección y, en el caso del PET, existe legislación que restringe el manejo del desecho.
- Los desechos accesibles (PS, PP y LDPE) vienen de distinta forma, desde empaques de objetos, hasta recipientes que contienen alimentos y medicina; el análisis de ellos para disponerlos de formas convenientes para la experimentación mediante la extrusión fue negativo en los laboratorios del Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros CIAP, ya que al ser polímeros producto de desechos, en su composición se encuentran metales que imposibilitan esta operación en los laboratorios.
- Se pueden acceder directamente de los gestores ambientales a los desechos dispuestos en forma de pellet, disposición versátil para la experimentación, ya que poseen dimensiones comparables con arena en el hormigón.
- La experimentación con 20% de LDPE en forma de tiras, obtenidas de manera mecánica; generó resultados poco óptimos en resistencia (10kg/cm^2 a los 28 días de vida)
- Según investigaciones sobre hormigones PET, los hormigones convencionales de 210 kg/cm^2 de resistencia, tienen mejores resultados que hormigones de 460, 306 y 180.
- Al mezclar 60% de polímero con hormigones convencionales de 210 kg/cm^2 , se obtuvieron materiales de resistencias a la compresión bajas, y por lo tanto poco versátiles a ser utilizadas.

- Al mezclar 20% de polímeros con hormigones convencionales de 210 kg/cm², se obtuvieron materiales de densidades fuera de los límites establecidos para hormigones livianos.
- Materiales óptimos con 30% de polímero reciclado (PS, PP Y LDPE) pueden tener resistencias comprendidas entre 43.33 kg/cm² hasta 56.94 kg/cm², y pudiendo reciclar desde 100.84 kg de desecho hasta 287.66 kg, por cada metro cúbico de material fabricado.
- Materiales óptimos con 40% de polímero (PS, PP y LDPE) pueden tener resistencias comprendidas entre 23.88 kg/cm² hasta 36.83 kg/cm², y pudiendo reciclar desde 155.70 kg de desecho hasta 378.91 kg, por cada metro cúbico de material fabricado.
- Los materiales óptimos obtenidos, en comparación con hormigones convencionales ligeros de agregado ligero de poliestireno por cada metro cúbico de material fabricado, tuvieron una disminución de 94.20 kg de cemento para materiales con 30% de polímero, y de 118.15 a 128.15 de kg de cemento para materiales de 40% de polímero. Representando una disminución de polución de CO₂ de 59.34 kg de CO₂ para materiales con 30% de polímero y de 74.44 a 80.74 kg de CO₂ para materiales con 40% de polímero.
- Mediante la ponderación de variables de respuesta ambientales y técnicas estructurales, es decir, ponderación de 0.4 para desechos reciclados, 0.3 para CO₂ evitado, 0.2 para resistencia y 0.1 para densidad. Se identificaron 2 materiales con mejores respuestas.
- Los materiales óptimos analizados al encontrarse dentro de los límites de los hormigones ligeros podrían utilizarse de igual manera, es decir, en forma de bloques no portantes, ladrillos, en cubiertas alivianadas.
- La adquisición de desechos pelletizados directamente de gestores ambientales implican un aumento del costo del desecho en aproximadamente un 285.71 % (el desecho no extruido tiene un costo de 0.35 USD el kilogramo, el desecho extruido y pelletizado tiene un costo de 1 USD el kilogramo).

- El beneficio ambiental expresado en términos económicos no es representativo respecto al costo de los materiales 4 y 1 (5.10 y 3.73 USD respectivamente).
- En base a que el costo de los materiales experimentales comprende entre 5 y 6 veces el costo del material convencional. Los costos de desecho plástico menores a 0.10 USD generarían materiales económicamente competitivos con respecto a los comúnmente ocupados.
- Los materiales obtenidos, definidas en términos de eliminación de desechos y de mitigación de CO₂ medidos en kilogramos, no poseen ventajas ambientales considerables. Ya que el costo del material es alto y no resulta atractivo su utilización para materiales alivianados.

Recomendaciones

- Dada la disminución de resistencias de los materiales de las pruebas preliminares con los materiales experimentales, se recomienda utilizar cemento Holcim tipo GU, cementos que aumentan la resistencia de los materiales pasados los 28 días de vida (tiempo en que se estima el 100% de la resistencia).
- Para valorar de mejor manera los materiales aquí expuestos, se recomienda hacer pruebas de resistencia al fuego, pruebas de resistencia a factores ambientales (temperatura, erosión eólica, exposición a rayos ultra violetas).
- Se recomienda experimentar con las mezclas óptimas aquí obtenidas en forma de ladrillos, bloques y adoquines.
- Se recomienda desarrollar y analizar un proyecto de reciclaje de desechos de PP y LDPE, considerando operaciones sobre los polímeros que no sea extrusión (como trituración, compactación, disolución), buscando abaratar costos.
- Realizar un análisis económico profundo para conocer las distintas variables que podrían afectar el costo de los materiales estudiados.

REFERENCIAS

- Alonso M., Lozano A., Madregal S., Vilte E., Apaza A. y Saravía J. (2001). *Degradación de poliestireno y polipropileno con microorganismos de vermicompost*. Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental de la Organización Panamericana de la Salud. Recuperado el 1 de agosto del 2013 de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/aidis12/plasticos.pdf>.
- American Society for Testing and Materials ASTM. (2003). *Standard Specification for Concrete Aggregates C33*. Estados Unidos. Recuperado el 15 de mayo del 2003 de <http://jdco.com.sa/pdf/C33.pdf>.
- Castillo Pazmiño M. (2012). *Informe técnico sobre consultoría para la realización de un estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos domésticos y asimilables a domésticos para el distrito metropolitano*. Quito, Ecuador: Empresa Pública Metropolitana de Aseo (EMASEO).
- Centro de educación y capacitación para el desarrollo sostenible de la. (2013). *¿Cuánto tiempo demora la naturaleza en transformar...?*. Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas". Recuperado el 1 de agosto del 2013 de http://www.uaz.edu.mx/semarnat/cuanto_tarda.html.
- Chacón Guerra E. y Lema Carrera G. (2012). *Estudio comparativo de elementos fabricados de hormigón con material reciclado PET (Polietileno tereftalato) y de hormigón convencional*. Proyecto de grado de ingeniería civil de la Escuela Politécnica Nacional. Quito Ecuador.
- Comisión Guatemalteca de Normas COGUANOR. (2007). *Práctica para la elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en el laboratorio. NTG 41060, equivalente a la norma ASTM C192*. Recuperado el 20 de agosto del 2013 de <http://www.iccg.org.gt/component/phocadownload/category/7-concreto?download=39:norma-ntg-41060-astm-c192-practica-para-elaboracion-y-curado-de-especimenes-de-ensayo-de-concreto-en-el-laboratorio>.

Cornish Álvarez M. (1997). *El ABC de los plásticos*. Universidad Iberoamericana, departamento de diseño industrial, gráfico y textil. México DF.

Design Expert. (2013). *Manual de ayuda de Design Expert 8*.

Disensa S.A. (2002). *Dosificación de hormigón 210 kg/cm² para Ingeniero Domingo Tipanta*. Quito Ecuador.

El Banco Mundial. (2010). *Emisiones de CO₂ (kt)*. Recuperado el 15 de mayo de 2013 de <http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT/countries?display=graph>.

Empresa Pública Metropolitana de Aseo de Quito EMASEO, Agencia de Noticias. (2013). *EMASEO EP se modernizó e implementó nuevos servicios en 4 años*. Quito Ecuador. Recuperado el 20 de septiembre del 2013 de <http://www.emaseo.gob.ec/index.php/notiaseo/item/emaseo-ep-se-modernizo-e-implemento-nuevos-servicios-en-4-anos.html>

Escobar Rubio P. (2013). *Registro histórico de materiales reciclables plásticos*. Reciclajes M y S. Quito Ecuador.

Escuela de Ingeniería Técnica Civil de la Universidad Politécnica de Cartagena. (2007). *Materiales de Construcción II*. Cartagena Colombia. Recuperado el 10 de Julio del 2013 de http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6203/mod_resource/content/1/Hormigon_02._Tipos_y_propiedades.pdf.

Hendriks C. y Graus W. (2002). Global carbon dioxide storage potential and costs. Ecofys. Recuperado el 30 de agosto del 2013 de http://www.ecofys.com/files/files/ecofys_2004_globalcarbondioxidestorage.pdf.

Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. (2010). *Hormigón de cemento hidráulico. Muestreo. NTE INEN 1763*. Quito Ecuador.

Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. (2010). *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico. NTE INEN 1573*. Quito Ecuador.

Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. (2013). *Hormigón de cemento hidráulico. Moldes para elaborar cilindros de hormigón verticales para ensayos. Requisitos. NTE INEN 2662*. Quito Ecuador.

International Cement Review. (2011). *The Global Cement Report, Ninth Edition*. <http://www.cemnet.com>.

Llorenz Molina J. (2012). *Clasificación de los polímeros. Universidad Politécnica de Valencia*. España. Recuperado el 1 de julio del 2013 de <https://polimedia.upv.es/visor/?id=ac48788e-890e-2b41-b8be-3c6f3f944811#>

Metro de Quito. (2012). *Estudio de impacto ambiental de la primera línea del metro de Quito – Marco Legal e Institucional*. Quito Ecuador 2012. Recuperado el 30 de junio del 2013 de: <http://web.ambiente.gob.ec/sites/default/files/users/vbolanos/Cap%C3%A Dtulo%203-Marco%20Legal%20110512.pdf>

Muñoz Rodríguez M. (2006). *Relleno de Zábiza Gestión Ambiental*. Quito, Ecuador. Recuperado el 6 de enero de 2013 de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/AEISA2006/gestionambiental.pdf>.

Ordenanza 332 del Distrito Metropolitano de Quito. (2010). *Ordenanza metropolitana de gestión integral de residuos sólidos del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito, Ecuador: Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.

Ordoñez Pinargote L., Baquerizo Cruz J., Del Pezo Reyes N. (2012). *Hormigón ligeros: con fibras de poliestireno expandido (Espumaplast-EPS)*. Universidad Estatal Península de Santa Elena, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil. Recuperado el 21 de julio del 2013 de <http://es.scribd.com/doc/105165630/HORMIGON-LIGEROS-POLIETILENO>.

Pietrobelli E. (2010). Estudio de viabilidad de PET reciclado en concreto con respecto a su resistencia. Universidad Comunitaria Regional de Chapecó. Brasil. Recuperado el 22 de julio del 2013 de <http://www5.unochapeco.edu.br/pergamum/biblioteca/php/imagens/000061/000061C4.pdf>.

Ralph A. Burns. (2003). *Fundamentos de Química*. Editorial Person Educación. 4ta Edición. México.

Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito. (2011). *Informe de gestores de residuos 2011*. Quito Ecuador.

Secretaría de Ambiente. (2008). *Atlas Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito Ecuador.

Servicio de Rentas Internas SRI. (2011). *Reforma tributaria - Diciembre 2011. Ley de fomento ambiental y optimización de los ingresos del estado. Impuesto a la Renta*. Quito Ecuador.

Servicio de Rentas Internas SRI. (2012). *Resolución No. NAC-CGERCGC12-00016*. Quito Ecuador.

Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria TULAS. (2012). Ecuador: Ministerio del Ambiente.

The Society of the Plastic Industry. (2013). *SPI Resin Identification Code - Guide to Correct Use*. Recuperado el 28 de junio de 2013 de

<http://www.plasticsindustry.org/AboutPlastics/content.cfm?ItemNumber=823&navItemNumber=1125>.

Valdez L. y Suarez G. (2010). *Hormigones Livianos*. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil Ecuador. Recuperado el 10 de julio del 2013 de <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10620/1/Hormigones%20livianos%20%28%20Luis%20Valdez-Gabriel%20Suarez%29.pdf>.

World Business Council for Sustainable Development. (2010). *Cement Sustainability Initiative - GNR PROJECT*. Recuperado el 15 de mayo de 2013 de <http://www.wbcdcement.org/GNR-2010/index.html>.

ANEXOS

Anexo 1. Diseño de hormigón convencional de resistencia 210 kg/cm² emitida por la empresa Disensa

DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN

SOLICITADO: Ing. Domingo Tipanta

PROYECTO:

Fecha: 16-sep-02

f'c:	210	Kg/cm ²	20,6	MPa	VERTIDO
------	-----	--------------------	------	-----	---------

TIPO	ASENTAMIENTO (mm)	CEMENTO	DESVIACIÓN	4,0 MPa
Vertido	1	30 a 50	1	A.C.I.
Bombeable	2	75 a 100	2	Sol Andino
		150 a 175	3	Rocafuerte
OPCIÓN	1		2	

MATERIALES Y SUS PROPIEDADES FÍSICAS

CONCEPTO	CEMENTO	PIEDRA	ARENA	
G. E.	2,95			CEMENTO: SOL ANDINO IP
PUS	kg/m ³	1.243,0	1.432,0	PIEDRA: N° 67 DE A. ROCAFUERTE - PIFO
PUC	kg/m ³	1.410,0	1.639,0	ARENA: AGREGADOS ROCAFUERTE - PIFO
T. Máximo	mm	19,0	-	ADITIVOS:
Módulo de F.	-	6,9	2,9	
Dsss	kg/m ³	2.450,0	2.430,0	
Absorción	%	4,0	5,8	
Hum. Nat.	%			

DOSIFICACIÓN:

MATERIAL	PESO SECO	PESO SSS	PESO EN E. NATURAL	VOLUMEN SSS
AGUA	277 Kg	203 Kg	Kg	0,203 m ³
CEMENTO	337 Kg	337 Kg	Kg	0,114 m ³
PIEDRA	860 Kg	895 Kg	Kg	0,365 m ³
ARENA	684 Kg	723 Kg	Kg	0,298 m ³
AIRE				0,020 m ³
TOTAL	2.158 Kg	2.158 Kg	Kg	1,000 m³

PESO UNITARIO 2.158 Kg/m³ A/C = 0,60

DOSIFICACIÓN POR VOLUMEN (m ³)		DOSIFICACIÓN POR PARIGÜELAS			
Agregados en estado saturados superficialmente secos		a (m)	b (m)	h (m)	m ³
AGUA	203 litros	0,30	0,30	0,30	0,027
CEMENTO	6,7 sacos	30,1	30,0	litros	
PIEDRA	0,72 m ³	1,0	1,0	saco	
ARENA	0,51 m ³	4,0	4,0	parigüelas	
		2,8	3,0	parigüelas	

Observaciones.-

1. La Dosificación es referencial, la resistencia del hormigón depende de las condiciones de fabricación, colado y curado.
2. Se deberán efectuar las correcciones por la humedad natural de los agregados.
3. Se recomienda el uso de un aditivo plastificante.
4. La cantidad de agua total deberá ser controlada para obtener un asentamiento de 10 ± 2 cm.

Anexo 3. Resultados de ensayos de compresión realizados en los Laboratorios de Mecánica de Suelos y Ensayo de Materiales de la Escuela Politécnica Nacional del hormigón convencional y de las pruebas preliminares



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES

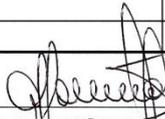
COMPRESIÓN EN CILINDROS DE HORMIGÓN

INF. No. 13-0683
Hoja 1 de 1

Quito, 10 de Mayo de 2013.

SOLICITA: ANDRES HERRERA
CONTRATISTA: *****
PROYECTO: TESIS
FISCALIZADOR: *****
ELEMENTO: INDICADOS
NORMA: ASTM C39/C39M - 05

No.	FECHA FABRICA	DESCRIPCION	FECHA	EDAD	P. ESPEC.	RESISTENCIA
			ROTURA	(dias)	(gr/cm ³)	(Kg/cm ²)
1	03/05/2013	HORMIGON F °C 210 KG/CM2	10-may-13	7	2,31	135
2	12/04/2013	HORMIGON F °C 210 KG/CM2	10-may-13	28	2,23	115
3	03/05/2013	TESIS	10-may-13	7	2,02	86
4	12/04/2013	TESIS	10-may-13	28	2,04	114
5	03/05/2013	TESIS	10-may-13	7	1,83	47
6	12/04/2013	TESIS	10-may-13	28	1,81	50
7	03/05/2013	TESIS	10-may-13	7	1,40	10
8	12/04/2013	TESIS	10-may-13	28	1,37	13
9	03/05/2013	TESIS	10-may-13	7	1,65	6
10	12/04/2013	TESIS	10-may-13	28	1,67	10


ING. MERCEDES VILLACÍS
JEFE DEL LABORATORIO

Laboratorio calificado por el INEN y miembro del Sistema Nacional de Laboratorios, SILA.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES

COMPRESIÓN EN CILINDROS DE HORMIGÓN

INF. No. 13-0747
Hoja 1 de 1

Quito, 23 de Mayo de 2013.

SOLICITA: ANDRES HERRERA
 CONTRATISTA: *****
 PROYECTO: TESIS
 FISCALIZADOR: *****
 ELEMENTO: INDICADOS
 NORMA: ASTM C39/C39M - 05

No.	FECHA FABRICA	DESCRIPCION	FECHA	EDAD	P. ESPEC.	RESISTENCIA
			ROTURA	(dias)	(gr/cm ³)	(Kg/cm ²)
15	13/05/2013	TESIS	21-may-13	8	2,01	108
16	22/04/2013	TESIS	21-may-13	29	1,97	120
17	13/05/2013	TESIS	21-may-13	8	1,64	24
18	22/04/2013	TESIS	21-may-13	29	1,69	37
19	13/05/2013	TESIS	21-may-13	8	1,33	15
20	22/04/2013	TESIS	21-may-13	29	1,35	13
21	13/05/2013	TESIS	21-may-13	8	1,89	80
22	22/04/2013	TESIS	21-may-13	29	1,96	89


 ING. MERCEDES VILLACIS
 JEFE DEL LABORATORIO

Laboratorio calificado por el INEN y miembro del Sistema Nacional de Laboratorios, SILA.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES

COMPRESIÓN EN CILINDROS DE HORMIGÓN

INF. No. 13-0829
Hoja 1 de 1

Quito, 04 de Junio de 2013.

SOLICITA: ANDRÉS HERRERA
 CONTRATISTA: ****
 PROYECTO: TESIS
 FISCALIZADOR: ****
 ELEMENTO: INDICADOS
 NORMA: ASTM C39/C39M - 05

No.	FECHA FABRICA	DESCRIPCION	FECHA	EDAD	P. ESPEC.	RESISTENCIA
			ROTURA	(días)	(gr/cm ³)	(Kg/cm ²)
1	28/05/2013	23	04-jun-13	7	1,54	9
2	07/05/2013	24	04-jun-13	28	1,58	14
3	28/05/2013	25	04-jun-13	7	0,97	1
9	07/05/2013	26	04-jun-13	28	1,06	2

ING. MERCEDES VILLACIS
JEFE DEL LABORATORIO



Laboratorio calificado por el INEN y miembro del Sistema Nacional de Laboratorios, SILA.

Anexo 4. Resultados de ensayos de compresión realizados en los Laboratorios de Mecánica de Suelos y Ensayo de Materiales de la Escuela Politécnica Nacional de los materiales experimentales



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES

COMPRESIÓN EN CILINDROS DE HORMIGÓN

INF. No. 13-1088
Hoja 1 de 1

Quito, 06 de Agosto de 2013.

SOLICITA: SR. ANDRES HERRERA
CONTRATISTA: *****
PROYECTO: TESIS
FISCALIZADOR: *****
ELEMENTO: INDICADOS
NORMA: ASTM C39/C39M - 05

No.	FECHA FABRICA	DESCRIPCION	FECHA	EDAD	P. ESPEC.	RESISTENCIA
			ROTURA	(días)	(gr/cm ³)	(Kg/cm ²)
1	05/07/2013	1 (1)	02/08/2013	28	1,89	61
2	05/07/2013	1 (2)	02/08/2013	28	1,89	55
3	05/07/2013	2 (1)	02/08/2013	28	1,90	48
4	05/07/2013	2 (2)	02/08/2013	28	1,87	56
5	05/07/2013	3 (1)	02/08/2013	28	2,02	52
6	05/07/2013	3 (2)	02/08/2013	28	2,00	58
7	05/07/2013	8 (1)	02/08/2013	28	1,81	35
8	05/07/2013	8 (2)	02/08/2013	28	1,77	34
9	05/07/2013	9 (1)	02/08/2013	28	1,84	45
10	05/07/2013	9 (2)	02/08/2013	28	1,84	48
11	05/07/2013	10 (1)	02/08/2013	28	1,91	38
12	05/07/2013	10 (2)	02/08/2013	28	1,89	38
13	05/07/2013	15 (1)	02/08/2013	28	1,47	5
14	05/07/2013	15 (2)	02/08/2013	28	1,51	8
15	05/07/2013	16 (1)	02/08/2013	28	1,71	44
16	05/07/2013	16 (2)	02/08/2013	28	1,73	45
17	05/07/2013	17 (1)	02/08/2013	28	1,77	25
18	05/07/2013	17 (2)	02/08/2013	28	1,74	24


ING. MERCEDES VILLACIS
JEFE DEL LABORATORIO





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES

COMPRESIÓN EN CILINDROS DE HORMIGÓN

INF. No. 13-1137
Hoja 1 de 1

Quito, 20 de Agosto de 2013.

SOLICITA: ANDRES HERRERA
CONTRATISTA: ****
PROYECTO: TESIS
FISCALIZADOR: ****
ELEMENTO: INDICADOS
NORMA: ASTM C39/C39M - 05

No.	FECHA FABRICA	DESCRIPCION	FECHA	EDAD	P. ESPEC.	RESISTENCIA
			ROTURA	(días)	(gr/cm ³)	(Kg/cm ²)
1	22/07/2013	4 "1"	19-ago-13	28	1,96	56
2	22/07/2013	4 "2"	19-ago-13	28	1,93	61
3	22/07/2013	5 "1"	19-ago-13	28	2,00	65
4	22/07/2013	5 "2"	19-ago-13	28	2,02	66
5	22/07/2013	6 "1"	19-ago-13	28	1,89	67
6	22/07/2013	6 "2"	19-ago-13	28	1,87	65
7	22/07/2013	6 "3"	19-ago-13	28	1,94	57
8	22/07/2013	6 "4"	19-ago-13	28	1,92	57
9	22/07/2013	7 "1"	19-ago-13	28	1,95	79
10	22/07/2013	7 "2"	19-ago-13	28	1,97	81
11	22/07/2013	11 "1"	19-ago-13	28	1,81	32
12	22/07/2013	11 "2"	19-ago-13	28	1,83	34
13	22/07/2013	12 "1"	19-ago-13	28	1,84	40
14	22/07/2013	12 "2"	19-ago-13	28	1,86	48
15	22/07/2013	13 "1"	19-ago-13	28	1,88	58
16	22/07/2013	13 "2"	19-ago-13	28	1,83	60
17	22/07/2013	14 "1"	19-ago-13	28	1,86	41
18	22/07/2013	14 "2"	19-ago-13	28	1,86	55
19	22/07/2013	18 "1"	19-ago-13	28	1,66	34
20	22/07/2013	18 "2"	19-ago-13	28	1,66	32
21	22/07/2013	19 "1"	19-ago-13	28	1,57	18
22	22/07/2013	19 "2"	19-ago-13	28	1,59	18
23	22/07/2013	20 "1"	19-ago-13	28	1,66	27
24	22/07/2013	20 "2"	19-ago-13	28	1,62	26
25	22/07/2013	21 "2"	19-ago-13	28	1,60	25
26	22/07/2013	21 "1"	19-ago-13	28	1,60	19


 ING. MERCEDES VILLACIS
 JEFE DEL LABORATORIO



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES

COMPRESIÓN EN CILINDROS DE HORMIGÓN

INF. No. 13-1175
Hoja 1 de 1

Quito, 23 de Agosto de 2013.

SOLICITA: ANDRES HERRERA
CONTRATISTA: ****
PROYECTO: TESIS
FISCALIZADOR: ****
ELEMENTO: INDICADOS
NORMA: ASTM C39/C39M - 05

No.	FECHA FABRICA	DESCRIPCION	FECHA	EDAD	P. ESPEC.	RESISTENCIA
			ROTURA	(dias)	(gr/cm ³)	(Kg/cm ²)
1	24/07/2013	22 "1"	22-ago-13	29	1,97	66
2	24/07/2013	22 "2"	22-ago-13	29	1,94	61
3	24/07/2013	23 "1"	22-ago-13	29	1,99	85
4	24/07/2013	23 "2"	22-ago-13	29	1,99	85
5	24/07/2013	24 "1"	22-ago-13	29	2,01	88
6	24/07/2013	24 "2"	22-ago-13	29	2,05	84
7	24/07/2013	25 "1"	22-ago-13	29	1,85	42
8	24/07/2013	25 "2"	22-ago-13	29	1,82	41
9	24/07/2013	26 "1"	22-ago-13	29	1,83	51
10	24/07/2013	26 "2"	22-ago-13	29	1,81	48
11	24/07/2013	27 "1"	22-ago-13	29	1,84	51
12	24/07/2013	27 "2"	22-ago-13	29	1,86	55
13	24/07/2013	28 "1"	22-ago-13	29	1,57	23
14	24/07/2013	28 "2"	22-ago-13	29	1,63	20
15	24/07/2013	29 "1"	22-ago-13	29	1,62	35
16	24/07/2013	29 "2"	22-ago-13	29	1,59	37
17	24/07/2013	30 "1"	22-ago-13	29	1,58	28
18	24/07/2013	30 "2"	22-ago-13	29	1,65	30

ING. MERCEDES VILLACIS
JEFE DEL LABORATORIO

