

Estudio de factibilidad de tubos plásticos para flujo a gravedad fabricados con material reciclado

Ortiz Moya E.; Madero Villalta G.; Lima Guamán P.

Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Ciencias
Físicas y Matemática, Laboratorio de Investigaciones Hidráulicas, Quito, Ecuador
e-mail: prlima@uce.edu.ec

Información del artículo
Recibido: julio 2018
Aceptado: septiembre 2018

Resumen

Esta investigación presenta una alternativa para la fabricación de tuberías de alcantarillado en base a material reciclado de la ciudad de Quito. Se sustenta la calidad de las tuberías fabricadas con polietileno de alta densidad (PEAD) reciclado mediante los ensayos para tuberías de alcantarillado: densidad, rigidez anular, aplastamiento entre placas, resistencia al impacto, transferencia de sustancias contaminantes desde el tubo hacia el agua que circula por la tubería y agrietamiento por estrés ambiental, los cuales fueron hechos para diferentes proporciones entre material reciclado y material virgen.

Palabras clave: Polietileno de Alta Densidad, Reciclaje, Tubería para Alcantarillado, Pruebas de Calidad en Tuberías.

Abstract

This research presents an alternative for the manufacture of sewer pipes based on recycled material from the Quito city. The quality of the pipes manufactured with recycled high-density polyethylene (HDPE) is supported by the tests for sewer pipes: density, ring stiffness, crushing between plates, resistance to impact, transfer of pollutants from the pipe to the water that circulates through the pipeline, and cracking by environmental stress, which were made using different proportions between recycled material and virgin material.

Key Words: High density polyethylene, recycling, Sewer pipe. Quality Testing in Pipes.

Introducción

En el país y en la ciudad de Quito la producción de residuos sólidos es muy alta, especialmente de residuos plásticos, en mayor cantidad el Polietileno de Alta Densidad (PEAD). Estos residuos plásticos tardan mucho tiempo en degradarse, ocupando un espacio significativo en los rellenos sanitarios, disminuyendo así su capacidad y tiempo de operación. En la actualidad, en los rellenos sanitarios se clasifican los materiales con la finalidad de reciclarlos. Actualmente, el objetivo principal del reciclaje del PEAD es la fabricación de mangueras para ductos eléctricos, madera sintética de polietileno, contenedores pequeños, recipientes de varios tamaños, entre otros. Sin embargo, el porcentaje de PEAD recuperado frente al eliminado, es muy pequeño, lo que implica que el resto va a ocupar un espacio en los rellenos sanitarios. Este documento presenta la alternativa para la elaboración de tuberías de alcantarillado que cumplan con las normas vigentes de desempeño mecánico e hidráulico aplicadas a las tuberías fabricadas con materia prima virgen, para el reciclaje del PEAD.

Justificación

En la ciudad de Quito se ejecutan constantemente obras de alcantarillado en las cuales se evidencia el uso de tuberías de plástico de diferentes diámetros. Por ejemplo, durante los últimos tres años se han instalado en el Distrito Metropolitano de Quito 202 708 m de redes de alcantarillado [1].

En la figura 1 se aprecia el incremento de redes de alcantarillado instaladas con tuberías plásticas, lo que refleja la creciente necesidad de tuberías.

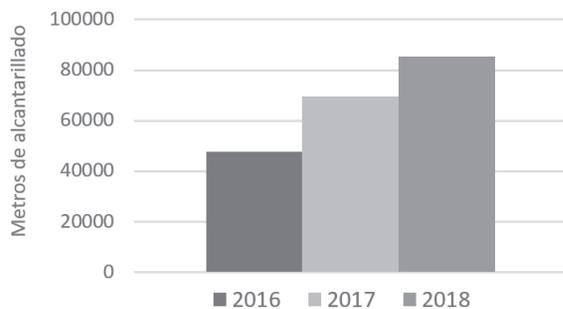


Figura 1. Redes de alcantarillado instaladas con tuberías plásticas en el DMQ

Marco Teórico

I. Residuos sólidos y reciclaje

Los residuos sólidos son producto de la relación del hombre con su medio, por lo que su mejor definición es: “Todo material descartado por la actividad humana, que no teniendo utilidad inmediata se transforma en indeseable” [2].

Los residuos sólidos, constituyen todos aquellos materiales desechados tras su vida útil, y que por sí solos carecen de valor económico. Se componen principalmente de desechos procedentes de materiales utilizados en la fabricación, transformación o utilización de bienes de consumo. Muchos de estos residuos son susceptibles de reaprovecharse o transformarse en otros productos con un correcto reciclado, llamándose por esta razón Residuos Sólidos Reciclables (RSR). Los principales “productores” de residuos sólidos están en las grandes ciudades, siendo las basuras domésticas las más voluminosas.

Los RSR, se componen de varios materiales como se indica en la figura 2, de los cuales se estima que se desecha alrededor de 53 925 kg de PEAD conocido también como “soplado”. [3].

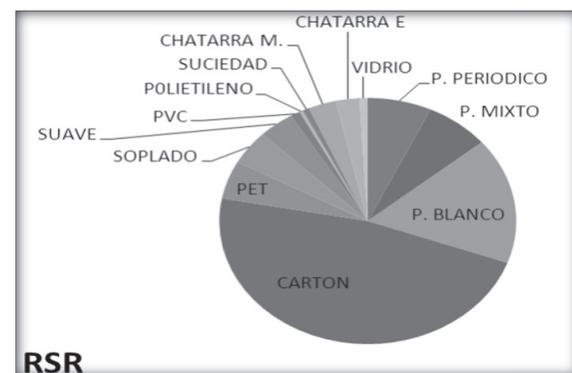


Figura 2. Composición de los RSR generados DMQ.

Por otro lado, la Constitución de la República del Ecuador, en los artículos 14 y 71, habla acerca de los derechos y necesidad de conservar el medio ambiente para garantizar así la sostenibilidad del buen vivir. Esto significa, que en el Ecuador se debe impulsar las actividades como el reciclaje. [4].

II. Polietileno

El etano es un gas compuesto, el cual, es un subproducto de la destilación del petróleo, o puede obtenerse a partir del gas natural. El etano a su vez es fraccionado (calentado hasta 800 °C y dividido en “etileno” e “hidrógeno”). El etileno es un gas compuesto de 2 átomos de carbono y 4 átomos de hidrógeno.

Los 2 átomos de carbono, en la molécula de etileno están unidos entre sí por un eslabón muy fuerte. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, este eslabón se rompe, lo que permite que una molécula de etileno se una a otras para formar una cadena en la que todos los átomos de hidrógeno están ligados y cada uno tiene 2 átomos de hidrógeno. Una cadena de moléculas de etileno se llama polietileno [5].

El PEAD se caracteriza por su firmeza, bajo costo, fácil de moldear mediante procesos de extrusión y de inyección, y resistente a quebraduras. Se utiliza en un 50% para producir botellas de plástico en el mercado. Puede ser utilizado en productos como leche, agua y jugos de fruta; así como también para contener detergentes, blanqueadores, aceites automotrices, entre otros.

El PEAD es uno de los plásticos más fáciles de reciclar, y se lo encuentra muy fácilmente dentro de los RSR; por tal motivo, se propone a este material como base de estudio de este proyecto.

III. Tuberías de plástico

Las tuberías de plástico constituyen conductos que deben ser diseñados para flujo a superficie libre, pueden ser utilizados para alcantarillas sanitarias, pluviales o combinadas; estos pueden además ser utilizados para conducir caudales destinados a sistemas de riego y drenaje agrícolas, así como también drenaje vial. Siendo que los caudales de estos sistemas de conducción son muy variables, entonces los diámetros de los tubos para flujo a gravedad también deben tener diámetros muy variados.

El principal problema de diseñar sistemas tubo plástico - suelo y de instalarlos es el comportamiento elástico que presentan estos sistemas, lo

cual puede llevar a tener deformaciones inmediatas y a largo plazo de estos sistemas.

Para que los sistemas tubo – suelo sean estables se debe estudiar la capacidad del tubo para soportar las cargas a las cuales es sometido (rigidez anular), el comportamiento del suelo cuando es compactado en los alrededores del tubo (reacción del suelo). De esta manera luego de un correcto diseño e instalación, los sistemas para flujo a gravedad enterrados podrán soportar las cargas vivas generadas por el tráfico vehicular y peatonal, y las cargas muertas generadas por el peso del relleno final y las estructuras colocadas sobre estos sistemas.

El concepto de la rigidez anular se refiere a la carga vertical que es capaz de soportar un tubo libre (sin agua en circulación y sin suelo de relleno alrededor) sin perder la capacidad de recuperar su forma original, sin que su capacidad hidráulica se vea comprometida y sin que la hermeticidad de las juntas se pierda. Las normas NTE INEN 2360 y NTE INEN 2059 definen el valor máximo de deflexión como el 3% del diámetro nominal interno del tubo (DNI). En conclusión, la RIGIDEZ ANULAR de un tubo, se define como la carga expresada en kN/m^2 que debe ser aplicada a un tubo plástico para deformarse el 3% del DNI [6].

A partir del valor de la rigidez anular, se clasifica a los tubos en series como se indica en la tabla 1:

Tabla 1. Series de tubos de Polietileno de alta densidad

SERIE DEL TUBO						
1	2	3	4	5	6	7
RIGIDEZ ANULAR MÍNIMA (kN/m^2) método de ensayo ISO 9969						
0.25	0.50	1	2	3.94	7.88	15.63
RIGIDEZ ANULAR MÍNIMA (kN/m^2) método de ensayo DIN 16961						
2	4	8	16	31.5	63	125

Fuente: NTE INEN 2360

Materiales y Metodología

A. Pelletización de PEAD reciclado

Este proceso consiste en transformar el PEAD desechado en materia prima apta para la fabricación de cualquier artículo, en este caso tubos.

Para mejorar la resistencia del material a la exposición al sol se añade *carbón black* en una proporción en masa del 4%. En la figura 3 se muestra el proceso secuencial.

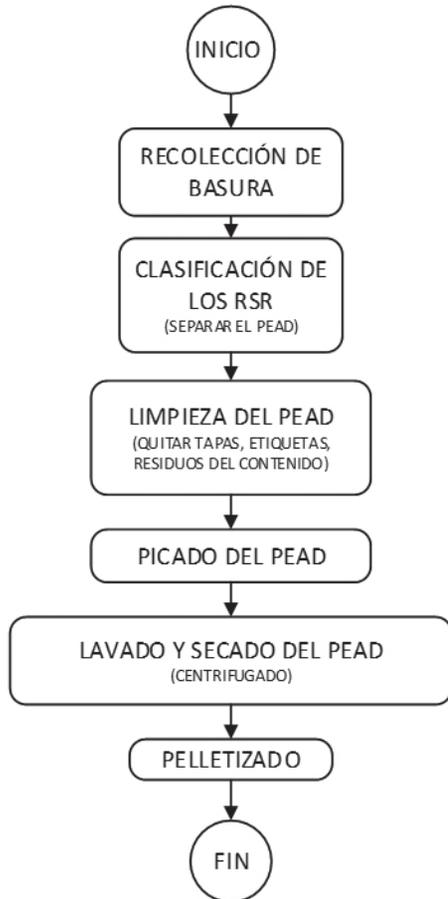


Figura 3. Proceso de Pelletización.



Figura 4. Material reciclado, Trituración del PEAD, y Centrifugado

B. Elaboración de muestras

El muestreo se realizó sobre mezclas de pellets, en diferentes proporciones de material reciclado con respecto a material virgen, con el fin de determi-

nar en cuál de ellas se obtiene el mejor comportamiento del producto terminado.

Tabla 2. Composición de la materia prima para la elaboración de muestras.

COMPOSICIÓN DEL MATERIAL	
PEAD VIRGEN	PEAD RECICLADO
100	0
75	25
50	50
25	75
0	100

La variable que define inicialmente los pellets es la densidad de la mezcla que se determina aplicando el principio de Arquímedes. Para cada composición de la materia prima se preparan muestras de 200, 600 y 1000 (mm) de diámetro para tener representatividad en las muestras, obteniendo un total de 15 muestras. El proceso de fabricación de los tubos inicia por la verificación de insumos, calibración y alimentación de tolva. A continuación, se realiza la extrusión, enfriamiento de perfil, control de espesores, ensamblado del tubo, registro de desperdicios y enfriamiento del tubo. Finalmente se realiza el corte del tubo y extracción de testigos para el control de calidad de las tuberías.

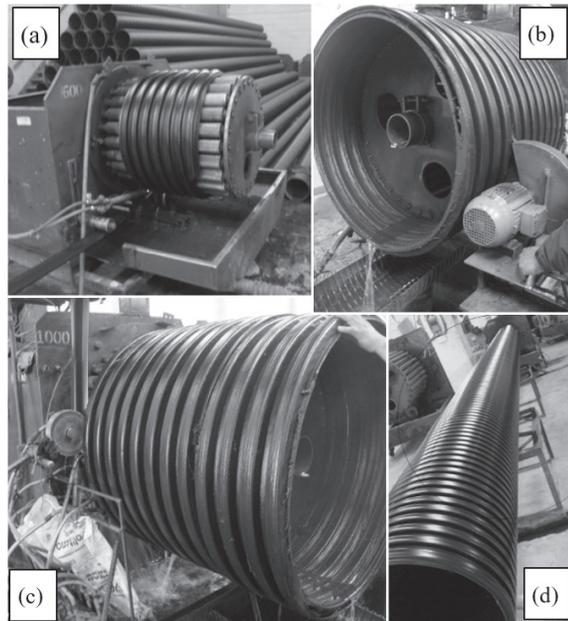


Figura 5. Fabricación de tuberías. (a)extrusión muestra de 600mm, (b)enfriamiento y control del espesor, (c)enfriamiento muestra de 1000mm, (d)ensamblado del tubo.

C. Pruebas de calidad en tuberías

Las pruebas de control de calidad realizadas se detallan a continuación:

1) Contaminación biológica

Se realiza el control del agua contenida por un lapso de 24 horas verificando que no existe migración de contaminantes bacteriológicos desde la muestra hacia el agua que está contenida en ellas.

2) Contaminación física y química

Se realiza el control del agua contenida por un lapso de 24 horas verificando que no existe migración de agentes químicos.

Los dos anteriores se comparan con los parámetros establecidos en el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria. (TULAS) obteniendo como resultado que el agua analizada es apta para el consumo humano.

3) Rigidez Anular

Se realiza según la NTE INEN 2360, con una deformación radial igual al 3% del diámetro nominal.

Se calcula la rigidez anular con la siguiente ecuación:

$$RA = \left[0.0186 + 0.025 * \frac{y}{d} \right] \frac{F}{l * y} \quad (1)$$

Donde:

F: fuerza correspondiente al 3.0% de deflexión del tubo (kN)

l: longitud de la muestra de prueba (mm)

y: deflexión correspondiente al 3.0% (mm)

d: diámetro nominal interno (mm)

De tal manera que $\frac{y}{d} = 0.03$ (2)

4) Aplastamiento entre placas

Se realiza según la NTE INEN 2360. Se ejerce una carga directa a la muestra del tubo hasta que éste se deforme o aplaste el 40% del diámetro nomi-

nal; en esta prueba se verifica que no haya fallas en la tubería que podrían alterar su funcionamiento mecánico; estas fallas pueden ser:

- Fisura en el perfil.
- Fisura en la pared interna.
- Delaminación.
- Fluencia del material.
- Rotura del tubo.

5. Resistencia al impacto

Se realiza según la NTE INEN 2360. Se verifica que la muestra luego de ser sometida a un impacto con una energía especificada de acuerdo con el diámetro nominal interno no presente un daño definitivo en su estructura, tal como en el aplastamiento entre placas.

6) Agrietamiento por estrés ambiental

Se realiza según la norma ASTM D 3350. Consiste en mantener 10 muestras del material del tubo sumergidas en una sustancia agresiva a una temperatura de 100°C durante 200 horas sin que se evidencien daños en las muestras. Se considera que la prueba ha sido superada si el 80% de las muestras se presentan inalteradas luego de la prueba.

Las pruebas de contaminación biológica y contaminación química se realizan solamente sobre muestras de PEAD virgen y de PEAD reciclado.

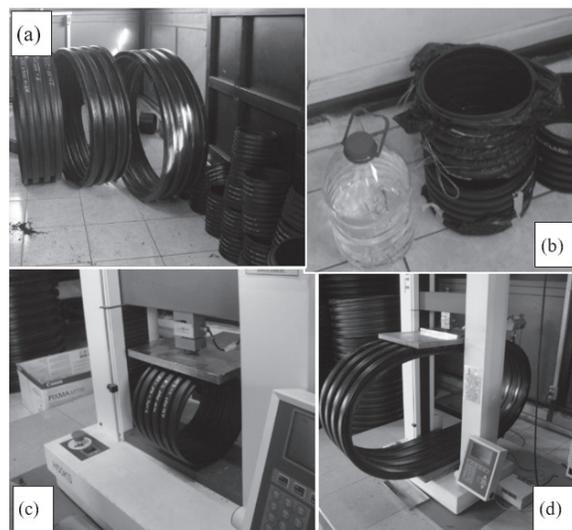


Figura 6. Pruebas en tuberías. (a) Testigos almacenados, (b) Estancamiento de agua, (c) Rigidez anular 600mm, (d) Aplastamiento entre placas 1000mm

Resultados

Las pruebas de calidad de las tuberías de PEAD reciclado se realizan según la Norma Técnica INEN 2360, obteniéndose los siguientes resultados:

A. Densidad del material

En la tabla 3 se muestran los resultados de los ensayos de densidad. Se evidencia que la densidad del material de los pellets es inversamente proporcional al porcentaje de material reciclado, teniendo como menor densidad 0.852g/cm^3 para una muestra preparada completamente con PEAD reciclado.

Tabla 3. Densidad de muestras de PEAD

%PEAD VIRGEN	%PEAD RECICL	Densidad (g/cm^3)		
		d1	d2	Promedio
100	0	0.940	0.944	0.942
75	25	0.953	0.927	0.936
50	50	0.906	0.905	0.906
25	75	0.883	0.887	0.886
0	100	0.865	0.843	0.852

La figura 7 muestra la disminución de la densidad al aumentar la cantidad de material reciclado.

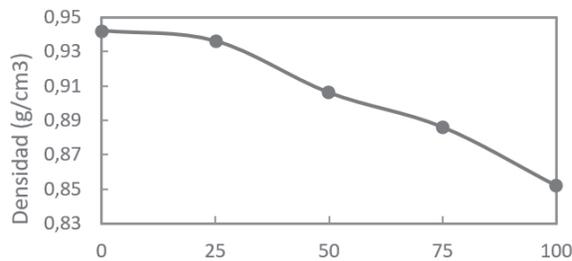


Figura 7. Variación de la densidad de los pellets de PEAD

B. Rigidez anular

Del ensayo de todas las muestras se obtienen los siguientes resultados para cada diámetro:

Tabla 4. Rigidez anular tuberías de diferentes diámetros

DIAM.	%PEAD VIRGEN	%PEAD RECICL	Espesores (mm)		Rigidez Anular
			e1	e3	
200 mm	100	0	3.49	4.85	7.31
200 mm	75	25	3.47	4.77	6.38
200 mm	50	50	3.56	4.57	7.32
200 mm	25	75	3.39	4.60	6.43
200 mm	0	100	3.29	4.63	8.17
600 mm	100	0	4.82	8.52	2.22
600 mm	75	25	4.73	8.69	2.29
600 mm	50	50	4.65	8.66	2.16
600 mm	25	75	4.70	8.59	2.13
600 mm	0	100	4.88	9.01	2.95
1000 mm	100	0	7.32	10.13	1.19
1000 mm	75	25	7.05	9.90	1.17
1000 mm	50	50	7.67	10.13	1.25
1000 mm	25	75	8.10	10.38	1.36
1000 mm	0	100	7.17	10.10	1.14

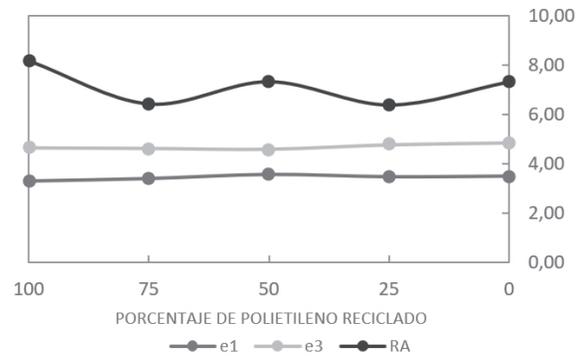


Figura 8. Variación de e1, e3 y rigidez anular tubería 200mm

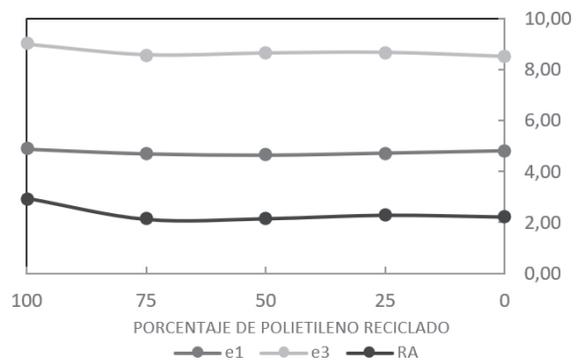


Figura 9. Variación de e1, e3 y rigidez anular tubería 600mm

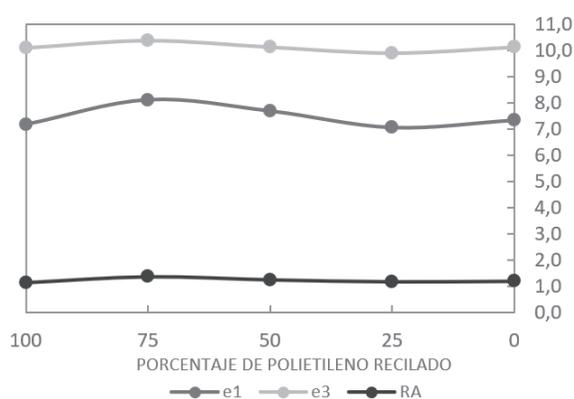


Figura 10. Variación de e1, e3 y rigidez anular tubería 1000mm

Al analizar los gráficos anteriores, se puede ver que la rigidez anular de las muestras ensayadas no presenta una variación muy grande en la rigidez anular; puede verse que incluso en los diámetros de 200 y 600 mm la rigidez anular es mayor para las muestras fabricadas con el 100% de material reciclado, obedeciendo esto a un proceso de cristalización del material al ser reciclado.

C. Aplastamiento entre placas

Las muestras ensayadas no presentan fallas en su estructura, lo que evidencia que todas las muestras sometidas a este ensayo tienen un desempeño estructural bueno.

D. Resistencia al impacto

Ninguna muestra sometida a esta prueba presenta una de las fallas especificadas. Por lo tanto, se considera que tanto las muestras fabricadas con material virgen como aquellas que fueron fabricadas con material reciclado superan esta prueba.

E. Agrietamiento por estrés ambiental.

Dos muestras correspondientes a una composición del 75% de material reciclado y 25% de material virgen se agrietaron en esta prueba. Se considera que incluso esta prueba es superada, ya que de esta composición fallaron 2 de 10 muestras ensayadas, es decir el 20%, lo cual está dentro de lo admisible por la norma.

Tabla 5. Determinación de variables físico-químicas

LÍNEA	CO ₂ soluble ppm	H ₂ S soluble ppm	Cloruros ppm	Conductividad μ-cm	Alcalinidad ppm	pH
Línea de transporte - descarga	100 - 130	0-0.5	20,000 - 50,000	1000 - 1500	200 - 250	5.5- 6.5
Agua de reinyección	400 - 500	0 - 0.5	50,000 - 70,000	1800 - 2500	200 - 250	5.5- 6.5

Conclusiones

La fabricación de tubos con PEAD reciclado es factible desde el punto de vista de desempeño mecánico del producto terminado, ya que supera muy bien las pruebas especificadas por las normas vigentes para estos tubos. Sin embargo, se debe realizar una investigación específica para determinar hasta cuántas veces se puede reprocesar o reciclar el PEAD sin que la cristalización del material afecte al comportamiento de los tubos.

Desde el punto de vista ambiental, el utilizar este tipo de materiales en la fabricación de tubos plásticos es prácticamente demandante, ya que se retirarían grandes cantidades de material plástico de los rellenos sanitarios.

Desde el punto de vista económico se evita la importación de materia prima, evitando pagar aranceles de nacionalización, teniendo una producción de tuberías con un componente de producción nacional al 100%.

Desde el punto de vista social se genera fuentes de trabajo para cumplir con todas las fases de los procesos inherentes a estas actividades, las mismas que pueden alcanzar niveles de organización y tecnificación muy elevados.

Referencias

- [1] EPMAPS, Departamento de Fiscalización, Información de obras de Alcantarillado ejecutadas en el DMQ, 2018.

- [2] G. Tchobanoglous, Gestión integrada de residuos sólidos: principios de ingeniería y cuestiones de gestión, New York; McGraw-Hill, 1993.
- [3] EMASEO, Caracterización de Residuos Sólidos a Nivel Cantonal, 2012.
- [4] Constitución de la República del Ecuador(2008). Ciudad Alfaro: Asamblea Constituyente.
- [5] J. Levi, reciclaje del polietileno de alta densidad (HDPE) para la fabricación de láminas, 1992. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec>
- [6] NTE INEN 2360: Tubos de polietileno (PE) de pared estructurada e interior lisa para alcantarillado. Requisitos e inspección Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2004, Disponible en: <https://archive.org/details/ec.nte.2360.2004>