

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Estudio de factibilidad para la innovación en la producción de la mezcla de
asfalto en Guatemala involucrando las botellas de polietileno de tereftalato
(PET)

Trabajo de graduación presentado por Adrian Humberto Lewin Quijada para optar el grado
académico de Licenciado en Ingeniería Industrial

Guatemala,

2020

Estudio de factibilidad para la innovación en la producción de la mezcla de
asfalto en Guatemala involucrando las botellas de polietileno de tereftalato
(PET)

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Excelencia que trasciende

DELVALLE
GRUPO EDUCATIVO

Estudio de factibilidad para la innovación en la producción de la mezcla de
asfalto en Guatemala involucrando las botellas de polietileno de tereftalato
(PET)

Trabajo de graduación presentado por Adrian Humberto Lewin Quijada para optar el grado
académico de Licenciado en Ingeniería Industrial

Guatemala,

2020

Vo.Bo.



Ing. Mardoqueo Velásquez Gómez

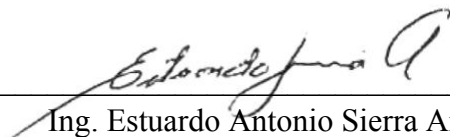
Tribunal examinador:



Ing. Mardoqueo Velásquez Gómez



Ing. Ingrid Lorena de León Vilaseca



Ing. Estuardo Antonio Sierra Arias

Fecha de aprobación del examen de graduación:

Guatemala, 25 de septiembre de 2020

Contenido

Lista de tablas	iv
Lista de imágenes	vi
Resumen	iii
Abstract.....	iii
I. Introducción	1
II. Justificación	2
III. Objetivos.....	3
IV. Marco Teórico	4
A. Generalidades del asfalto	4
C. Requisitos para la mezcla de asfalto	6
D. Agregado	7
E. Polímero	7
F. Estadística de los desechos de Guatemala	7
G. Fases para la sustitución en el área líquida.....	9
H. Sustitución en el área sólida	10
I. Demanda del asfalto en Guatemala.....	10
V. Metodología.....	12
VI. Resultados	19
A. Sustitución área líquida	19
B. Sustitución área sólida	22
C. Análisis económico.....	22
VII. Discusión.....	41
VIII. Conclusiones.....	45
IX. Recomendaciones.....	47
X. Bibliografía.....	48
XI. Anexos.....	50

Lista de tablas

Tabla	Página
1. Graduación del cemento asfáltico para base negra.....	5
2. Requisitos para la mezcla de asfalto.....	6
3. Tipos de graduación para material pétreo de capa de base negra.....	7
4. Desechos en toneladas de sólidos en el vertedero de basura de la zona 3 de la ciudad capital de Guatemala, 2018.....	8
5. Composición de residuos generados en porcentaje.....	8
6. Agregados y proporciones.....	10
7. Cálculos de material a necesitar de agregados en sustitución en área líquida.....	14
8. Cálculos de bitumen a sustituir y material para realizar la degradación en los diferentes escenarios en área líquida.....	15
9. Cantidad de agregado en galones a utilizar en sustitución sólida.....	15
10. Material a utilizar de PET y agregado en diferentes escenarios en área sólida.....	16
11. Prestaciones a utilizar.....	17
12. Costo y uso de materiales del asfalto sin modificación.....	22
13. Salario de mano de obra del asfalto sin modificación.....	23
14. Costo de producción diario del asfalto sin modificación.....	23
15. Costo y uso de materiales con sustitución en área líquida del 10% en bitumen.....	24
16. Salario asignados de mano de obra con sustitución en área líquida.....	24
17. Costo de producción diario con sustitución en área líquida del 10% en bitumen.....	24
18. Costo y uso de materiales con sustitución en área líquida del 25% en bitumen.....	25
19. Costo de producción diario con sustitución en área líquida del 25% en bitumen.....	25
20. Costo y uso de materiales con sustitución en área líquida del 30% en bitumen.....	26
21. Costo de producción diario con sustitución en área líquida del 30% en bitumen.....	26
22. Costo y uso de materiales con sustitución en área líquida del 35% en bitumen.....	27
23. Costo de producción diario con sustitución en área líquida del 35% en bitumen.....	27
24. Costo y uso de materiales con sustitución en área líquida del 50% en bitumen.....	28
25. Costo de producción diario con sustitución en área líquida del 50% en bitumen.....	28
26. Resumen del área líquida.....	29
27. Costo y uso de materiales diarios con sustitución en área sólida del 10% en agregados.....	29
28. Salario asignados de mano de obra con sustitución en área sólida.....	29
29. Costo de producción diario con sustitución en área sólida del 10% en agregados.....	30
30. Costo y uso de materiales diarios con sustitución en área sólida del 25% en agregados.....	30
31. Costo de producción diario con sustitución en área sólida del 25% en agregados.....	31
32. Costo y uso de materiales diarios con sustitución en área sólida del 30% en agregados.....	31
33. Costo de producción diario con sustitución en área sólida del 30% en agregados.....	31
34. Costo y uso de materiales diarios con sustitución en área sólida del 35% en agregados.....	32
35. Costo de producción diario con sustitución en área sólida del 35% en agregados.....	32

36. Costo y uso de materiales diarios con sustitución del 50% en agregados.....	33
37. Costo de producción diario con sustitución en área sólida del 50% en agregados	33
38. Resumen del área sólida	33
39. Caja de flujo de asfalto sin modificación	34
40. Caja de flujo de asfalto con sustitución en área líquida del 10% en bitumen	35
41. Caja de flujo de asfalto con sustitución en área líquida del 25% en bitumen	35
42. Caja de flujo de asfalto con sustitución en área líquida del 30% en bitumen	36
43. Caja de flujo de asfalto con sustitución en área líquida del 35% en bitumen	36
44. Caja de flujo de asfalto con sustitución en área líquida del 50% en bitumen	37
45. Caja de flujo de asfalto con sustitución en área sólida del 10% en agregados.....	37
46. Caja de flujo de asfalto con sustitución en área sólida del 25% en agregados.....	38
47. Caja de flujo de asfalto con sustitución en área sólida del 30% en agregados.....	38
48. Caja de flujo de asfalto con sustitución en área sólida del 35% en agregados.....	39
49. Caja de flujo de asfalto con sustitución en área sólida del 50% en agregados.....	39
50. Resultados del TIR de los diferentes escenarios tanto como en área líquida como sólida.....	40
51. Porcentajes de PET que se puede llegar a aprovechar en los escenarios del área líquida	43
52. Porcentajes de PET que se puede llegar a aprovechar en los escenarios del área sólida.....	43

Lista de imágenes

Imagen	Página
1. Gráfica de Pie de materiales recolectados.....	9
2. Diagrama del proceso dividido en fases.....	9
3. Consumo nacional de productos petroleros 2018.....	11
4. Diagrama de metodología.....	12
5. Sistema de reflujo.....	13
6. Parrilla de calentamiento y agitación.....	17
7. Campana de extracción.....	17
8. Primer análisis espectro de muestra de DPET.....	19
9. Segundo análisis espectro de muestra de DPET.....	20
10. Tercer análisis espectro de muestra de PET.....	20
11. Unión de bitumen con DPET.....	21
12. Unión del bitumen con DPET en diferentes porcentajes almacenadas en contenedor de aluminio.....	21
13. Resultados de prueba de calor de la unión de bitumen con DPET.....	21
14. Gráfica de sensibilidad de los diferentes escenarios.....	40

Resumen

Este trabajo consistió en estudiar la factibilidad de poder incorporar el plástico de las botellas de tereftalato de polietileno (PET) en la mezcla del asfalto. Se buscó cumplir con los requisitos de las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes de Guatemala, y adicionalmente encontrar el porcentaje de PET desechado en el vertedero de basura ubicado en la zona 3 de la ciudad de Guatemala que se puede llegar a aprovechar con este tipo de producción innovadora.

El estudio se realizó sustituyendo diferentes porcentajes desde dos vías: el área sólida y el área líquida. Se analizaron los costos de producción que esta tiene y se realizó un análisis de sensibilidad para poder determinar si es de beneficio para el proyecto.

La producción del asfalto sin ninguna modificación se realiza obteniendo los agregados mediante la combinación de piedra triturada, arena de río, polvo de trituración y material de relleno. Los agregados son recubiertos con cemento asfáltico o bitumen. Para evaluar su factibilidad en la mezcla o aceptación en el producto terminado se inició haciendo pruebas en la vía líquida, ya que el proceso es más largo y con más pruebas que se tienen que cumplir reglamentariamente; en esta área se sustituyó el 10%, 25%, 30%, 35% y 50% del bitumen incorporando PET degradado en los porcentajes mencionados. Luego se realizó la prueba en el área sólida; sustituyendo el material de agregados, teniendo en cuenta los diferentes tipos de graduación y el tamaño del tamiz. El tamiz sirve para la distribución del tamaño del agregado dependiendo del tipo de asfalto que se esté trabajando. Para este estudio se analizó un asfalto tipo "D" el cual se utiliza en las carreteras de Guatemala y se realizaron sustituciones en el tamiz de media pulgada en los porcentajes del 10%, 25%, 30%, 35% y 50% reemplazando con PET triturado. Por último, se prosiguió al análisis económico para poder validar si el escenario planteado es rentable o no, usando de referencia los costos de producción que se tiene sin modificar el asfalto.

Este proyecto se trabajó dentro de las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala en el laboratorio de química orgánica y en un laboratorio externo de asfaltos.

Abstract

The following project will study the facility to incorporate the plastic bottle of polyethylene terephthalate (PET) into the asphalt mix. It seeks to accomplish the requirements of “Las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes” and additionally to look at the percentage of discarded PET in the garbage dump located in zone 3 of Guatemala city that can take advantage with this type of innovative production.

The study was carried out by substituting different percentages from two ways: the solid area and the liquid area. The daily production cost will be analyzed and a sensitivity analysis will be done to determine if there is a benefit to the project.

The production of the asphalt without any modification is carried out obtaining the aggregates through the combination of crushed stone, river sand, crushed powder and filler material. The aggregates are covered with asphalt cement or bitumen. In order to evaluate its feasibility in the mixture or acceptance in the finished product, tests were started on the liquid route, since the process is longer and with more tests that have to be done by regulation; 10%, 25%, 30%, 35% and 50% of the bitumen will be replaced in this area incorporating degraded PET in the mentioned percentages. Then the test was performed in the solid area; replacing the aggregate material, taking into account the different types of gradation and the sieve size. The sieve is used for the distribution of the aggregate size depending on the type of asphalt being worked. For the present study, a type “D” asphalt was analyzed, which is used on the Guatemalan roads and substitutions were made in the half-inch sieves in the percentages of 10%, 25%, 30%, 35% and 50% replacing with crushed PET. Finally, the economic analysis was continued in order to validate whether the scenario proposed is profitable or not, using the production cost without modifying the asphalt as reference.

This project will be worked within the facilities of Universidad Del Valle de Guatemala, in the organic chemistry laboratory and in an external asphalt laboratory.

I. Introducción

En la actualidad, el material PET es uno de los plásticos más utilizados en el año 2018 en el vertedero de basura de la zona 3 de la ciudad capital de Guatemala se concentraron 940,140 toneladas de desechos sólidos, siendo el 13% de esta cantidad desechos plásticos. El periodo de descomposición está entre los 100 y los 1,000 años (Ortiz, 2017; Ruiz, 2013), por lo que buscarle otro sentido de utilidad en el que se pueda aprovechar positivamente es necesario; considerando construir infraestructuras resilientes que promuevan la industrialización sostenible y fomenten la innovación.

Al involucrar botellas de tereftalato de polietileno (PET) a la mezcla de asfalto, se ha tenido buenos resultados en la carretera ya finalizada, como son: elasticidad, viscosidad, resistencia, buen comportamiento ante las altas temperaturas y un mayor tiempo de vida. Un claro ejemplo se refleja en Inglaterra, India, Canadá y Costa Rica, en donde ya se experimentó el uso del polímero en la mezcla del asfalto.

Por eso se decidió llevar a cabo un estudio de factibilidad para la innovación en la producción de la mezcla de asfalto en Guatemala involucrando las botellas de polietileno de tereftalato (PET). Además de brindarle los aportes mencionados anteriormente al asfalto en Guatemala, también es importante saber si el involucrar PET beneficia los costos de producción comparando diferentes escenarios, tomando como base la producción del asfalto sin modificar en nuestro país. Existen estudios y modificaciones al asfalto realizado en otros países, sin embargo el poder tener los datos específicos para Guatemala con cifras reales de la cantidad de PET que es posible obtener y considerando así una modificación mediante la vía líquida es muy oportuno para la ejecución de este proyecto.

Adicional y complementariamente, hacer un análisis de sensibilidad con la tasa de interés de retorno (TIR) de los diferentes escenarios modificados, permite observar el comportamiento de los mismos, concluyendo con la factibilidad de este proyecto innovador.

II. Justificación

La economía circular propone un cambio al paradigma “reducir, reutilizar y reciclar”, esto puede permitir la disminución del impacto negativo causado por el ser humano al medio ambiente. Bajo este enfoque, el residuo pierde su condición de tal y se convierte en materia prima, siendo esto lo que se quiere lograr con este proyecto; tomando el material, en este caso las botellas PET que ya fueron utilizadas y convirtiéndolo en materia prima para la creación de asfaltos modificados.

En diferentes países como Inglaterra, India, Canadá, y Costa Rica han experimentado la utilización del polímero como parte de la mezcla del asfalto. Esta implementación trajo consigo buenos aportes a la carretera ya terminada, entre los que se puede mencionar mejor elasticidad, viscosidad y resistencia. También se experimentó una mejor respuesta antes las altas temperaturas y un mayor tiempo de vida. Por tal motivo, es muy importante y necesario poder estudiar la factibilidad de este innovador proyecto en nuestro país, pensando en la mejora continua y considerando aspectos de la ingeniería para la solución a la problemática que existe en varios lugares en cuanto al buen estado de las carreteras.

En el año 2018, el Instituto Nacional de Estadística Guatemala (INE), registró 940,140.00 toneladas de desechos sólidos en el vertedero de basura de la zona 3 de la ciudad capital de Guatemala. El 13% de los desechos sólidos de ese año son representados por desechos plásticos. Complementando con un informe de sostenibilidad del mismo año de una empresa dedicada a trabajar con material reciclado, se encontró que al separar materiales plásticos el 58% se trataba de material PET, el cual puede llegar a aprovecharse de otra forma.

La justificación para realizar este proyecto se centra en el hecho de que reciclar botellas PET para emplearlas en el asfalto, contribuye a la preservación del medio ambiente de forma integral, ya que se reduce la explotación de recursos naturales y la contaminación. Con un proyecto como este también se ahorra energía y recursos económicos, ya que al consumir menos petróleo se regulan las emisiones de dióxido de carbono entre otros temas. Sin embargo, es importante destacar muy especialmente que este proyecto tiene como valor agregado el hecho de producir un impacto positivo en la vida de las personas de la comunidad. Adicionalmente este proyecto propicia un cambio cultural encaminado al estilo de vida del reciclaje con propósitos definidos.

Este proyecto puede llegar a ser socialmente impactante, debido a que tiene el potencial para generar un cambio cultural en nuestro país, al crear un sentido de pertenencia en los guatemaltecos, siendo partícipes de la construcción y del mantenimiento de las calles y carreteras. Adicional, y a manera de condensar los beneficios de este proyecto cabe mencionar que con su implementación se crean fuentes de empleo y por ende se da una mejora para la economía del país; aspectos muy necesarios en nuestra sociedad actual.

III. Objetivos

A. General:

1. Estudio de factibilidad para la innovación en la producción de la mezcla de asfalto en Guatemala involucrando las botellas de polietileno de tereftalato (PET).

B. Específicos:

1. Añadir al proceso de la mezcla de asfalto para la vía seca o líquida y la factibilidad que se tiene en cada proceso.
2. Investigación de en qué porcentaje puede llegar a impactar económicamente el costo de producción en la mezcla de asfalto implementando las botellas PET.
3. Medir el porcentaje que se puede llegar a aprovechar del desecho de PET en Guatemala.

IV. Marco teórico

A. Generalidades del asfalto:

La palabra asfalto proveniente de la palabra “Sphalto” que significa “lo que hace caer”, fue adoptada por el griego, luego utilizada en latín y más adelante adoptada al español como “asfalto”. Estudios arqueológicos, tienen conocimiento que la utilización más antigua de la palabra en el contexto de la construcción se remonta al año 3200 A.C.

La American Society for Testing and Materials (ASTM) define al asfalto como un material ligante de color marrón oscuro a negro, constituido principalmente por betunes que pueden ser naturales u obtenidos por refinación del petróleo. El asfalto se presenta en proporciones variables en la mayoría de los petróleos crudos. El betún o bitumen, según ASTM, es una sustancia ligante oscura o negra que puede ser natural o artificial y que está compuesta principalmente por hidrocarburos de alto peso molecular como los son los asfaltos, alquitranes, breas y asfálticas. (ASTM Standard d8)

La producción del asfalto sin ninguna modificación se enfoca en concentrar la materia prima; los agregados se obtienen mediante la trituración de piedra o grava y su combinación con arena de río, polvo de trituración y material de relleno. Otra forma de obtener los agregados es adquirirlos a través de proveedores que cumplan con los requisitos de calidad. Los agregados son recubiertos con cemento asfáltico o bitumen, el cual se obtiene a través del petróleo extraído de los pozos, o bien con proveedores que cumplan con los requisitos para el cemento asfáltico establecidos en las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes.

Para los asfaltos modificados se lleva a cabo el mismo proceso, solamente que estos pueden ser mejorados mediante la adición de modificadores del asfalto como lo son los polímeros que incluyen los elastómeros, compuestos metálicos, compuestos azufrados, fibras y silicones.

A continuación se encuentra la tabla de graduación del cemento asfáltico para base negra de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos:

Tabla No. 1 Graduación del cemento asfáltico para base negra.

Tipo y grado del cemento asfáltico	Especificación
Graduación por viscosidad:	AASHTO M 226
AC-10	
AC-20	
AC-40	
Graduación por penetración:	AASHTO M 20
40-50	
60-70	
85-100	
120-150	
Graduación PG (Performance Grade):	AASHTO MP1
64-22	
70-22	
76-22	
82-22	

Datos obtenidos de *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Camino*

B. Tipos de asfaltos:

1. Pavimento de concreto asfáltico en caliente:

Este pavimento se trabaja con la trituración de piedra o grava, combinando con arena de río y/o polvo mineral de trituración y material de relleno. Este sistema es usado tradicionalmente en los proyectos de pavimentación en Guatemala para definir las propiedades del concreto asfáltico y los procedimientos para el diseño de mezclas de concreto asfáltico usando el método Marshall. (Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, 2001)

2. Pavimento de concreto asfáltico reciclado en caliente:

Este trabajo consiste en la utilización del material recuperado según la sección 311 Fresado del Pavimento Asfáltico, y el procesamiento y posterior colocación conforme la sección 401 Pavimento de Concreto Asfáltico en Caliente. (Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, 2001)

3. Mezcla asfáltica en frío:

Este trabajo consiste en: la obtención y explotación de canteras o bancos de piedra o grava, en estado natural, clasificadas o bien trituradas total o parcialmente, combinándolas con agregados recuperados, arena o polvo de roca para producir un agregado clasificado. (Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, 2001)

4. Asfalto modificados:

Las propiedades del cemento asfáltico se pueden mejorar mediante la adición de modificadores del asfalto, las cuales pueden ser polímeros que incluyen los elastómeros, compuestos metálicos, compuestos azufrados, fibras y silicones.

Este tipo de asfalto en específico es el que se evaluó en este presente proyecto, ya que el polímero puede llegar a modificar las propiedades del cemento asfáltico, siendo estas:

- a. Susceptibilidad a la temperatura
- b. Adhesión a los agregados
- c. Resistencia a la deformación permanente
- d. Resistencia al agrietamiento por fatiga
- e. Ductilidad
- f. Elasticidad

(Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, 2001)

C. Requisitos para la mezcla de asfalto:

En el libro de especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos de Guatemala se describe los requisitos para la mezcla del material pétreo y el cemento asfáltico.

A continuación se encuentra la Tabla de Requisitos para la mezcla de asfalto considerando métodos de diseño y valores límites:

Tabla No. 2 Requisitos para la mezcla de asfalto

Método de diseño	Valores límites	
	Mínimo	Máximo
1) MARSHALL (ASTM D 1559)		
- Temperatura de compactación de pastilla para producir una viscosidad de	0.25 Pa-s (250 cS)	0.31 Pa-s (310 cS)
- Número de golpes de compactación en cada extremo del espécimen	75	75
- Estabilidad	454 Kg (1,000 Libras)	-----
- Fluencia en 0.25 mm (0.01 de pulgada)	8	16
- Porcentajes vacación en la mezcla compactada	3	8
- Porcentaje vacíos rellenos con asfalto	60	75
- Relación Estabilidad/Fluencia (lb./0.01 pulg.)	70	-----
- Relación finos/bitumen	0.6	1.6

Datos obtenidos de *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos.*

D. Agregado:

Un agregado en el contexto del asfalto es cualquier material mineral duro e inherente en forma de partículas graduadas o fragmentos que se utiliza como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo roca.

El material debe cumplir con los requisitos de graduación determinados según AASHTO T 27 y T 11, los cuales están resumidos en la tabla presentada a continuación:

Tabla No. 3 Tipos de graduación para material pétreo de capa de base negra

Estándar mm	Tamiz No.	Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 27)			
		Tipo "A" 50 mm (2") máximo	Tipo "B" 38 mm (1 1/2") máximo	Tipo "C" 25 mm (1") máximo	Tipo "D" 19.1 mm (3/4") máximo
50.0	2"	100			
38.1	1 1/2"	-	100		
25.0	1"	65-90	70-100	100	
19.0	3/4"	-	60-90	70-100	100
12.5	1/2"	-	-	-	80-100
9.5	3/8"	-	45-75	-	70-90
4.75	Nº 4	25-60	30-60	35-65	45-70
2.36	Nº 8	-	-	-	30-55
2.00	Nº 10	-	20-50	-	-
0.425	Nº 40	10-30	10-30	12-30	-
0.075	Nº 200	3-12	5-15	5-15	4-8

Datos obtenidos de *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos.*

E. Polímero:

Un polímero es un material de consistencia con alto peso molecular formado por la unión de muchas unidades pequeñas de nombre monómeros. El número de partículas de polímeros que se repiten en una molécula grande es denominado grado de polimerización. Se forman así moléculas gigantes que desarrollan formas con diversas cadenas. El tereftalato de polietileno (PET) es un tipo de poliéster que contiene alto peso molecular siendo así uno de los materiales que más se utilizan para la fabricación de botellas. (Ortíz, 2017)

F. Estadística de los desechos de Guatemala:

Las siguientes tablas son estadísticas de los desechos sólidos que ingresan al vertedero de basura de la zona 3 de la ciudad capital de Guatemala. Estos datos son proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística Guatemala (INE) en sus plataformas digitales.

Tabla No. 4 Desechos en toneladas de sólidos en el vertedero de basura de la zona 3 de la ciudad capital de Guatemala, 2018.

Mes	2017 (Toneladas)	2018 (Toneladas)
Total	699,024.0	940,140.0
Enero	58,252.0	78,345.0
Febrero	58,252.0	78,345.0
Marzo	58,252.0	78,345.0
Abril	58,252.0	78,345.0
Mayo	58,252.0	78,345.0
Junio	58,252.0	78,345.0
Julio	58,252.0	78,345.0
Agosto	58,252.0	78,345.0
Septiembre	58,252.0	78,345.0
Octubre	58,252.0	78,345.0
Noviembre	58,252.0	78,345.0
Diciembre	58,252.0	78,345.0

Datos obtenidos de la base de datos del INE.

Tabla no. 5 Composición de residuos generados en porcentaje.

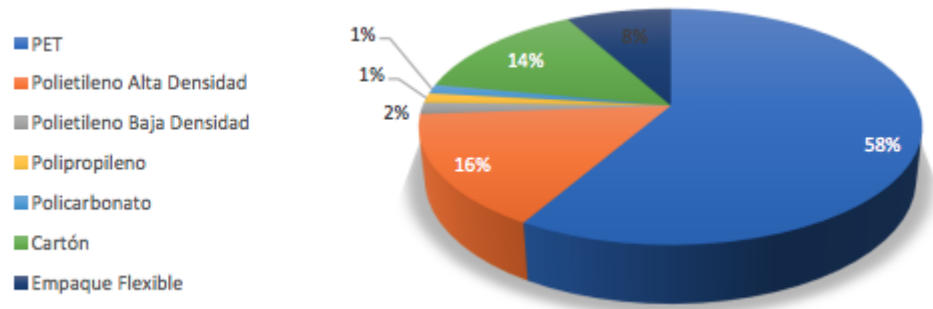
Tipo de residuo	%
Orgánico	42
Plástico	13
Papel	15
Vidrio	5
Metal	3
Neumáticos	2
Otro	20
Total	100

Datos obtenidos de la base de datos del INE.

Se puede observar que los desechos aumentaron considerablemente en el lapso de un año y que los plásticos representan un 13% de los residuos generados en el 2018. A diferencia de los residuos orgánicos y de papel, el plástico no tiene una biodegradación tan acelerada, por lo que es de gran importancia poder buscar la forma de darle al plástico una segunda función luego de ser desechado.

La siguiente gráfica de pie es obtenida en un informe de sostenibilidad del año 2018 de una empresa que se dedica a trabajar con material reciclado.

Imagen No. 1 Gráfica de Pie de materiales recolectados.



Obtenida del informe de sostenibilidad de INGRUP .

G. Fases para la sustitución en el área líquida:

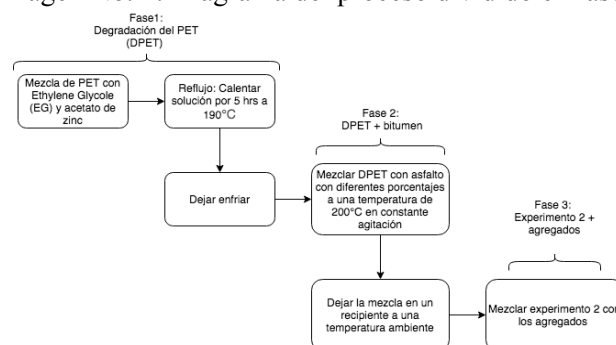
Para la sustitución en el área líquida, el proceso que se llevó a cabo dividido en tres diferentes fases. La primera fase será la degradación del PET, la segunda fase será la unión del PET degradado junto con el bitumen y por último la unión del resultado de la segunda fase con los agregados siendo completada así la tercera fase.

El tereftalato de polietileno (PET) es un material resistente a la biodegradación, por lo cual se considera material no biodegradable. Su periodo de descomposición está entre los 100 y los 1000 años. (Ortíz, 2017; Ruiz, 2013). Para este proyecto se decidió degradar el PET para poderlo obtener de igual forma en un estado líquido. Este proceso se lleva a cabo mediante reacciones como la hidrólisis, metanólisis y sobre todo la glicólisis. Se consideró que la glicólisis era la mejor opción para la degradación del PET debido a que la metanólisis y la hidrólisis se llevan a cabo en condiciones de temperatura y presión mayores a la de glucólisis, además, considerando las condiciones ácidas y básicas de la hidrólisis ya que esta genera mayores problemas ambientales, situación que se quiere evitar.

Para llevar a cabo la glicólisis del PET fue utilizado el solvente etilenglicol (EG), debido a que se trata de un glicol capaz de despolimerizar un compuesto, en este caso el PET.

Este proyecto necesita de un agente en la reacción que promueva la degradación en un lapso de tiempo más corto, motivo por el cual se seleccionó el acetato de zinc como catalizador.

Imagen No. 2: Diagrama del proceso dividido en fases.



Elaboración propia, con datos obtenidos de Alzuhairi, Mohammed & Al-Ghaban, Ahmed & Almutalabi, Shams. (2018). *Chemical recycling of polyethylene terephthalate (waste water bottles) for improving the properties of asphalt mixture.*

H. Sustitución en el área sólida:

Para la sustitución de los agregados en el área sólida se consideraron dos fases. La primera fase es la obtención de PET triturado que cumpliera con el estándar para el número de tamiz utilizado en el cumplimiento de los requisitos de graduación. La segunda fase es la unión del PET triturado con el bitumen y el resto de los agregados que componen el asfalto.

Para los cálculos de la sustitución en agregados, se utilizó la Tabla No. 6 la cual nos indica el porcentaje del peso de agregado total a utilizar dependiendo de la medida del material mineral. En este caso se utilizó una cantidad de 1,200 gramos de agregado en diferentes escenarios llamados punto 1, 2, 3, 4 y 5.

Para el punto 1 se utilizó 1,200 gramos de agregado que representa el 96.00% de la mezcla. Esta se desglosa por el tamaño de material utilizado y el porcentaje que esta ocupa en la mezcla. El 4.00% restante de la mezcla es cemento asfáltico. Lo mismo sucedió con el punto 2, se utilizó 1,200 gramos de agregado representado el 95.50% de la mezcla y el 4.50% el cemento asfáltico; así sucesivamente con los puntos 3,4 y 5.

La Tabla No. 6 se tomará como referencia para saber el porcentaje del tamaño de material que se utilizará en el proyecto, el cual es de media pulgada representando el 50% del peso de agregado a utilizar. En este proyecto se utilizará el punto 5, ya que se analizará el asfalto con 6% de bitumen y el 94% de material agregado.

Tabla No. 6 Agregados y proporciones.

Agregados		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
		%	%	%	%	%
Medida de tamiz para material mineral	Porcentaje	96	95.5	95	94.5	94
1/2 a 0	50	600	600	600	600	600
3/8 #8	15	180	180	180	180	180
3/4 esp.	20	240	240	240	240	240
1" N° 56	15	180	180	180	180	180
Peso de agregado total a utilizar		1,200	1,200	1,200	1,200	1,200

Cox, Pablo. 2015. *Manual de laboratorio para estudiantes para el desarrollo de ensayos en concreto asfáltico en caliente.*

I. Demanda del asfalto en Guatemala

A continuación se encuentra la Imagen No. 3 la cual según datos proporcionados por el Ministerio de Energía y Minas de Guatemala describe el consumo nacional de productos petroleros de los años 2010- 2018, en donde se puede observar la tendencia en consumo de los productos petroleros entre los cuales se encuentra el asfalto.

La unidad utilizada es el barril americano, el cual en una tonelada se encuentran 7.6 barriles.

Imagen No. 3 Consumo nacional de productos petroleros 2018.

Producto/Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
GLP	2,809,555.23	3,010,212.01	3,226,896.47	3,371,434.26	3,504,847.07	4,085,131.93	4,367,979.80	4,595,881.79	2,379,857.76
Gasolina Aviación	14,077.00	14,202.00	14,495.20	14,218.45	11,180.18	13,530.62	12,652.05	11,829.86	5,791.22
Gasolina Superior	4,924,596.67	4,726,783.61	4,914,346.20	4,902,732.81	5,214,014.99	6,110,255.70	6,729,455.91	6,889,609.98	3,435,642.04
Gasolina Regular	3,242,091.99	3,222,412.66	3,129,800.59	3,604,590.07	4,139,358.75	5,193,802.68	5,629,752.61	6,076,267.04	3,190,150.19
Kerosina	606,584.50	573,408.31	608,865.32	588,622.49	634,003.34	665,817.82	700,057.58	755,959.98	2,855.11
Combustible Turbo Jet									386,203.24
Diesel	9,250,196.07	9,309,593.79	9,301,470.40	9,799,543.92	10,487,844.28	11,305,141.20	11,982,407.00	12,189,165.39	0.00
Disel LS									6,368,352.83
Diesel ULS									77,325.00
Bunker	3,610,510.57	4,106,884.18	3,986,495.43	3,140,353.29	3,038,800.76	3,597,930.27	2,988,145.67	1,879,137.46	787,900.26
Asfalto	257,379.04	276,134.64	266,893.97	195,043.20	252,195.02	163,666.11	87,067.14	193,793.88	167,698.51
Orimulsión	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Petcoke	965,931.73	1,077,139.47	928,829.74	1,126,975.30	1,255,360.72	1,150,844.48	1,136,844.98	1,998,938.71	1,165,654.24
Butano								586.28	379.88
Total	25,680,922.80	26,316,770.67	26,378,093.32	26,743,513.79	28,537,605.11	32,286,120.79	33,634,362.74	34,591,170.37	17,967,810.28

Datos obtenidos de la base de datos del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala

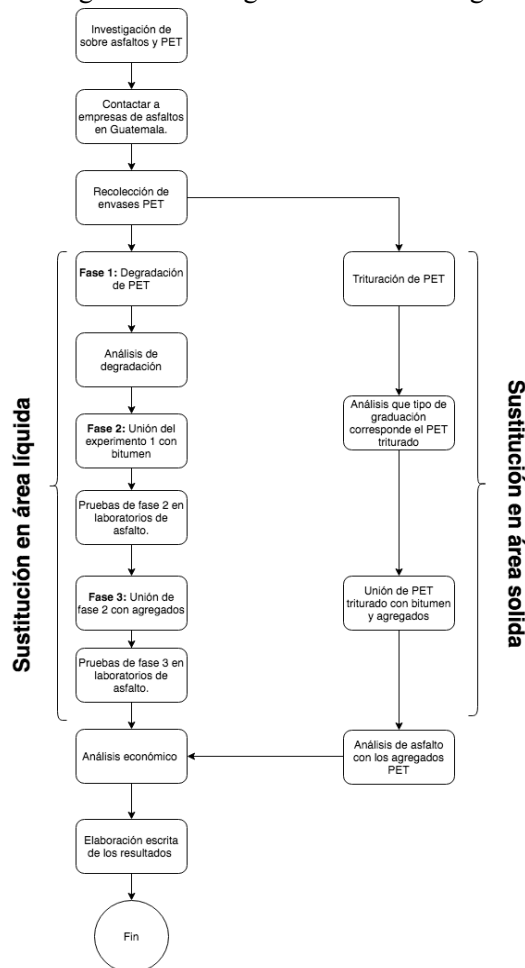
V. Metodología

A. Producción

En este proyecto se evidenció la viabilidad de innovar en la producción de la mezcla de asfalto en Guatemala a través de dos diferentes métodos involucrando las botellas de polietileno de tereftalato (PET). El primer método es a través de la sustitución en el área líquida, reduciendo porcentajes de bitumen e incorporando el PET degradado (DPET). En el segundo método se agregó PET triturado sustituyendo porcentajes de agregados.

A continuación en la Imagen No. 4 se podrá apreciar el diagrama del proceso que se llevó a cabo.

Imagen No. 4 Diagrama de metodología



Elaboración propia, con datos obtenidos de Alzuhairi, Mohammed & Al-Ghaban, Ahmed & Almutalabi, Shams. (2018). *Chemical recycling of polyethylene terephthalate (waste water bottles) for improving the properties of asphalt mixture.*

Para la producción en la sustitución en área líquida se recolectaron envases PET de uso diario como botellas de agua pura o aguas gaseosas, las cuales fueron higienizadas adecuadamente. Se les retiró las etiquetas y se procedió a lavarlas con agua y jabón para luego secar. La degradación se hizo mediante un sistema de reflujo como se observa en la Imagen No. 5, en donde se les agregó PET cortado, acetato de zinc y etilenglicol. Por cada 100 ± 0.0001 gramos de PET, se le colocó 116 ± 5 mL de etilenglicol y 0.5% de acetato de zinc basado en el peso del PET. La degradación del PET (DPET) se realizó para convertirlo a estado líquido y de esta forma pasar al segundo paso el cual permite realizar la unión con el bitumen.

La unión con el bitumen se realizó a través de probetas de 100 mL, con una incertidumbre de ± 5 mL, para sustituir en área líquida un volumen del 10%, 25%, 30%, 35% y 50% del bitumen por PET degradado (DPET). Luego se procedió a llevar la mezcla del bitumen y el DPET en envases de aluminio a los laboratorios de asfalto para realizar la prueba de calor. Esta prueba consiste en someter el nuevo cemento asfáltico modificado en un horno a alta temperatura durante 24 horas, en donde se observa si se forma una capa en la superficie conocida como nata, si esto ocurre significa que se dividieron los materiales.

Imagen No. 5 Sistema de reflujo



B. Logística del proceso

Se trabajó el área de producción, se calculó los materiales necesarios para una producción diaria de 100 toneladas de asfalto y sus respectivos costos a través de cotizaciones con proveedores.

El cálculo de los materiales para 100 toneladas de asfalto se estableció a través de una entrevista a una empresa de asfaltos en la Ciudad de Guatemala, en donde se verificó que en una tonelada de asfalto el volumen que ocupa el bitumen es de un 6%, lo cual representa 15 galones y el porcentaje restante son agregados, es decir que la capacidad de una tonelada es de 250 galones. Con este dato se infiere que para 100 toneladas, el 6% de bitumen son 1,500 galones y 23,500 galones de

agregado. Cabe mencionar que en una tonelada se contabilizan 0.4 m³ de asfalto ya instalado.

a. Área líquida

Los agregados se convirtieron a litros multiplicando 3.785 y se dividió entre 1,000 que es la conversión para un metro cúbico y así obtener los datos exactos. Como se puede observar en la Tabla No. 7 se realizó en excel para tener más claridad de la información.

Tabla No. 7 Cálculos de material a necesitar de agregados en sustitución en área líquida.

	Bitumen	Agregado
Porcentaje	6.00%	94.00%
Cantidad en galones	1,500.00	23,500.00
m ³		88.95

Para obtener la cantidad de PET a necesitar se estableció que la cantidad de galones de bitumen se multiplica por el porcentaje que se quiere llegar a sustituir, como se reportó el resultado en galones, se utilizó el factor de conversión litros a galones en donde un galón es igual a 3.785 litros y el factor de conversión para obtener litros es de 1,000 mL. Por último, se determinó la cantidad de PET utilizando la relación peso/volumen, en la cual la cantidad a sustituir en gramos, para este proyecto 10 g, 25 g, 30 g, 35 g y 50 g, se dividen en 100 mL para obtener la cantidad de PET a utilizar en la unidad de gramos.

El cálculo del etilenglicol que se requiere para realizar la degradación se realiza considerando que por cada 100 gramos de PET se coloca 116 mL de etilenglicol, por lo que se hace una regla de tres con el peso de PET ya obtenido anteriormente multiplicado 116 mL de etilenglicol con el peso de PET en gramos dividido entre 100 gramos de PET ; lo que nos da la cantidad de los mililitros de etilenglicol que se utilizarán en la producción final. Este dato se convirtió a galones dividiendo entre 4,546.09 mililitros siendo ésta la conversión para obtener el etilenglicol en galones debido a que es vendido en esa presentación.

Por último, se convirtió los gramos de PET a kilogramos (kg), multiplicando por 0.001, para poder obtener los pedidos a realizar de PET triturado y cuanto acetato de zinc se utilizó. El acetato de zinc que se llega a utilizar en la degradación es el 0.05% del peso del PET, se calculó el peso en kg porque la presentación a la venta del producto es en kg.

De igual forma para obtener el número de pedidos a realizar de PET triturado en kg se realizó la división del PET en kg entre 500, la razón para realizar esto, es porque la venta mínima del proveedor de este material es de 500 kg. En la siguiente tabla se puede apreciar la cantidad de bitumen a sustituir y los materiales que se requieren para los diferentes escenarios para llevar a cabo la degradación del PET (DPET).

Tabla No. 8 Cálculos de bitumen a sustituir y material para realizar la degradación en los diferentes escenarios en área líquida.

Cantidad de galones de bitumen a utilizar	Porcentaje a sustituir	Cantidad a sustituir (galones de bitumen)	Gramos de PET triturados a utilizar (± 0.0001)	kg de PET triturado a utilizar (± 0.0001)	Etilenglicole a utilizar (gal) (± 5)	Acetato de Zinc a utilizar (kg) (± 0.0001)
1,500.00	10.00%	150.00	56,775.00	56.78	0.15	0.03
	25.00%	375.00	354,843.75	354.84	0.91	0.18
	30.00%	450.00	510,975.00	510.98	1.30	0.26
	35.00%	525.00	695,493.75	695.00	1.77	0.35
	50.00%	750.00	1,419,375.00	1,419.38	3.62	0.71

b. Área sólida

Para los escenarios del área sólida se debe de tomar en cuenta el tamaño del tamiz que se utilizará, ya que el tamiz sirve para la distribución del tamaño del agregado. Dependiendo del tipo de asfalto que se quiere trabajar dependerá que número de tamiz utilizar, el tamiz más grande es el de 2" y el más pequeño es el tamiz No. 200 que tiene una medida de 0.075 mm. En este caso se trabajará con un asfalto tipo "D", la cual es utilizada en Guatemala para las carreteras. Este tipo de asfalto trabaja con los tamices de $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", No. 4 y No. 200.

En los escenarios del área sólida para los cuales se reducen los agregados, se trabajó con el tamaño del material de $\frac{1}{2}$ ". Empleando el mismo procedimiento que se obtuvo para los agregados en los escenarios de la sustitución en el área líquida, se encontró el agregado para estos escenarios utilizando los 1,500 galones de bitumen, (Tabla No. 6.) La cantidad obtenida en galones de agregado se multiplicó por el 50%, como se observa en la Tabla No. 9, esto representa el peso del agregado del material de $\frac{1}{2}$ de pulgada a utilizar en una producción de 100 toneladas.

Tabla No. 9 Cantidad de agregado en galones a utilizar en sustitución sólida

Porcentaje del peso de agregado a utilizar	Cantidad de agregado en galones
100%	23,500
50%	11,750

Obteniendo este valor, se trabajó con los diferentes escenarios para sustituir el 50%, 35%, 30%, 25% y 10% en agregado del material de media pulgada a utilizar, por lo que se multiplica por el porcentaje y se obtiene la cantidad de galones de agregado que se llegará a sustituir, como se observa en la Tabla No. 10.

Con este resultado se requiere pasar los galones obtenidos a kilogramos, que es la unidad con la cual el proveedor realiza la venta. El procedimiento es multiplicar los galones obtenidos por 3.785, la cual es la cantidad de litros en un galón, luego se multiplica por 1,000 mililitros, que es la cantidad que cabe en un litro y luego se multiplica por $1.33 \frac{g}{cm^3}$, lo cual es la densidad del PET en donde un centímetro cúbico

es igual a un mililitro, por lo que se obtendrá gramos. El último paso es dividir entre 1,000 para realizar la conversión a kilogramos.

Ya que el porcentaje del peso de material a utilizar de agregado no se sustituye del todo, la cantidad de agregado no sustituida en galones se agrega a la cantidad de galones de agregado, esta cantidad se convierte a metros cúbicos, multiplicando por 3.785 para convertirlo en litros y dividiendo entre 1,000 para obtener los metros cúbicos que se necesitan de agregados.

A continuación se observa la tabla con los diferentes escenarios y los materiales de PET triturados y agregados a utilizar.

Tabla No. 10 Material a utilizar de PET y agregado en diferentes escenarios en área sólida.

Cantidad a sustituir (galones de agregado)	Porcentaje de peso a sustituir	Cantidad a utilizar (galones de PET triturado)	kg de PET triturados a utilizar (± 0.0001)	Cantidad de galones no sustituida de agregado	m ³ de agregado
11,750.00	10.00%	1,175.00	5,915.01	22,325.00	84.50
	25.00%	2,937.50	14,787.52	20,562.50	77.83
	30.00%	3,525.00	17,745.03	19,975.00	75.61
	35.00%	4,112.50	20,702.53	19,387.50	73.38
	50.00%	5,875.00	29,575.04	17,625.00	66.71

Elaborar un prototipo a menor escala es viable tomando en cuenta el desarrollo del plan acerca del material requerido para 100 toneladas de asfalto mediante la vía sólida. Además con este prototipo, se puede realizar las pruebas para poder comprobar la factibilidad del proceso y que este cumpla con los requerimientos para la mezcla de asfalto de la Tabla No. 2.

C. Análisis financiero

Para esta sección se calculó el costo de producción de cada escenario, los cuales son:

1. El total de costos diarios de producción sin modificar el asfalto.
2. El total de costos diarios de producción modificando el asfalto en el área líquida, sustituyendo el 10%, 25%, 30%, 35% y 50 % en bitumen con PET degradado (DPET).
3. El total de costos diarios de producción modificando el asfalto en el área sólida, sustituyendo un 10%, 25%, 30%, 35% y 50% en agregados del material de media pulgada con PET triturado.

El cálculo del total de costos diarios de producción se realizó considerando una planta produciendo 100 toneladas de asfalto y los proveedores de agregado y de bitumen. Esta planta cuenta con un gerente, una secretaria, cuatro operarios, un laboratorista y dos personas de limpieza y mantenimiento. Para la mano de obra se tomó en cuenta las prestaciones que se encuentran en la Tabla No. 11. El total de costos diarios de producción se obtuvo mediante la suma de la materia prima (MP), mano de obra directa (MOD) y los costos indirectos de fabricación (CIF).

Tabla No. 11 Prestaciones a utilizar.

Prestaciones	Valor
Aguinaldo	8.33%
Bono 14	8.33%
Vacaciones	4.17%
Pasivo laboral (indemnización)	9.72%
IGSS	10.67%
IRTRA	1.00%
INTECAP	1.00%
Total	43.22%

Para obtener los costos de la materia prima se solicitaron cotizaciones a empresas de trituración y de químicos, en donde se puede encontrar etilenglicol o acetato de zinc . Se recibieron de esta forma los costos y las presentaciones en las que venden los productos. El costo del bitumen fue cotizado en dólares americano, por lo que se convirtió a quetzales mediante la información que presentaba el 4 de marzo del presente año el Banco de Guatemala. Para el costo de la electricidad se utilizó la tarifa que brinda la empresa eléctrica de Guatemala EEGSA por kWh.

Para los escenarios de la sustitución del bitumen se determinó el uso y el costo de la electricidad tomando en cuenta el consumo aproximado de una parrilla de calentamiento con agitación, la cual consume 650W y una campana de extracción que consume 110W. La parrilla y la campana se presentan en las imágenes a continuación.

Imagen No. 6 Parrilla de calentamiento y agitación



Imagen No. 7 Campana de extracción



Adicional se consideró un análisis de sensibilidad comparando la tendencia de la tasa de rentabilidad (TIR) dependiendo del escenario para poder concluir si los costos benefician a la producción del asfalto con PET o no comparando con la TIR del asfalto sin modificar; de ser así, se establecerá en qué escenario trae mayor beneficio. Se desplegará en excel y se usarán las fórmulas que la plataforma brinda. El contexto para este análisis es similar al de costos totales diarios de producción, con la variante para obtener el total de costo mensual de producción de 30 días produciendo 5 veces a la semana 100 toneladas por día.

Con el dato de costo mensual de producción se realizará una caja de flujo obteniendo la anualidad con una tasa de interés del 4% del Banco Banrural de Guatemala publicadas en sus plataformas del mes de enero 2020 para empresas menores a un plazo de 5 meses y utilizando la fórmula "PMT". Luego se proyectará el ahorro al implementar este proyecto, el cual es la diferencia entre el costo total de producción mensual sin modificar el asfalto con el costo total de producción mensual del asfalto modificado, dependiendo el escenario a evaluar.

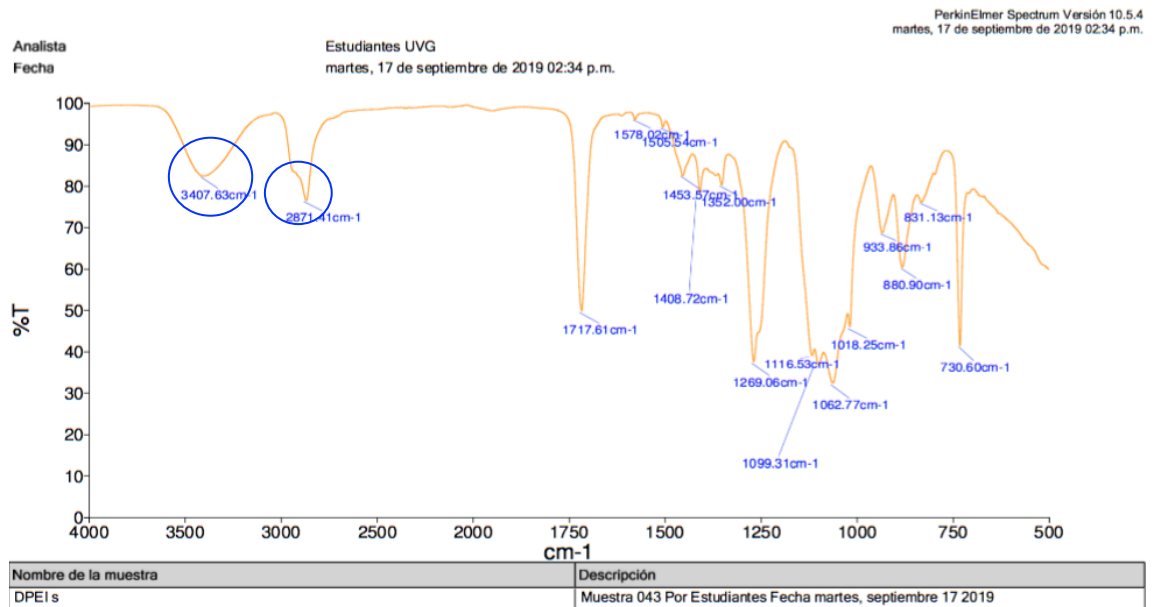
Al realizar la caja de flujo se procederá a encontrar la tasa interna de retorno (TIR), con la función "IRR" ingresando los datos económicos obtenidos de la caja de flujo.

VI. Resultados

A. Sustitución área líquida

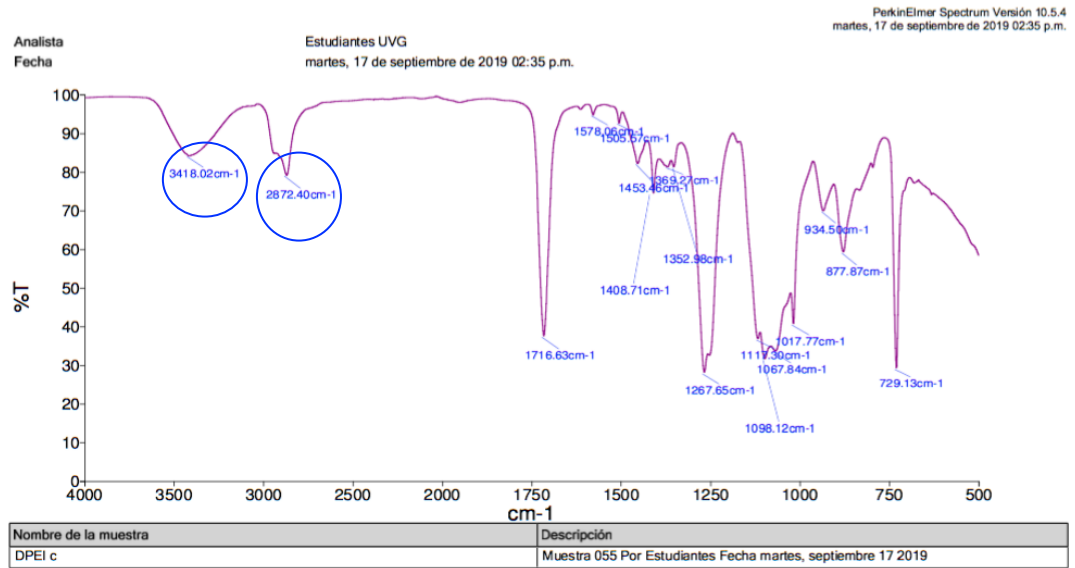
Se realizaron tres degradaciones, estas fueron comprobadas mediante un análisis de espectro el cual nos indica mediante vibraciones los enlaces de la molécula que contiene el material y que fueron degradados con éxito. La onda de la tensión asimétrica, en la Imagen No. 8, se redujo a 2,871.41 cm^{-1} cuando comparando con la onda del PET sin degradar ronda los 2,924 cm^{-1} (Anexos, Imagen No. 9). Otro indicio que hace saber que el PET fue degradado con éxito es el primer pico que se creó de 3,407.63 cm^{-1} , el cual en un análisis PET no se marca; esto nos indica que existen nuevos enlaces en la molécula y por lo tanto se convirtió en PET degradado (DPET) exitosamente.

Imagen No. 8 Primer análisis espectro de muestra de DPET



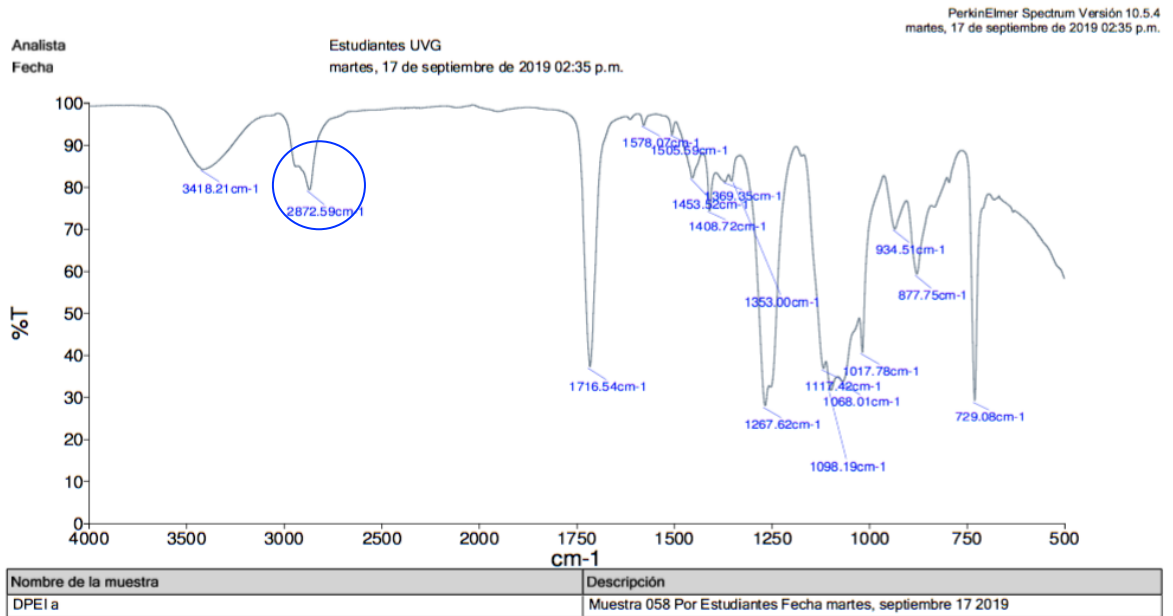
En la Imagen no. 9 se puede observar de la misma manera que la onda de la tensión asimétrica se redujo a 2,872.4 cm^{-1} . Al igual que en la imagen anterior se creó el primer pico a una vibración de 3,418.02 cm^{-1} . Este pico nos indica que existen nuevos enlaces dentro de la mezcla de la molécula del material por lo que se puede decir que el PET está degradado.

Imagen No. 9 Segundo análisis espectro de muestra de DPET



En la Imagen No. 10. se puede observar que la onda de la tensión asimétrica se redujo a 2,872.59 cm^{-1} y se creó el primer pico de 3,418.21 cm^{-1} ; estos hallazgos nos indican que existen nuevos enlaces dentro de la mezcla del PET y que se transformó a DPET.

Imagen No. 10 Tercer análisis espectro de muestra de PET



El resultado de la degradación fue un material líquido, en cierta medida viscoso y el cual se utilizó para realizar la unión con el bitumen como se puede observar en la Imagen No. 11. El material al enfriarse se solidifica y al exponerse al calor pasa de nuevo a estado líquido. En la Imagen No. 12 se puede observar la nueva mezcla que contiene diferentes porcentajes de DPET colocada en varios recipientes de aluminio y lista para ser transportada.

Imagen No. 11 Unión de bitumen con DPET



Imagen No. 12 Unión del bitumen con DPET en diferentes porcentajes almacenadas en contenedor de aluminio.



Se transportó las muestras a un laboratorio de asfalto en donde se sometió a una prueba de calor durante 24 hrs. La nueva mezcla de asfalto no pasó la prueba, ya que al finalizar la misma se pudo observar la separación de los materiales; se creó una nata, la cual es un indicador que el DPET y el bitumen se aislaron, como se observa en la Imagen No. 13.

Imagen No. 13 Resultados de prueba de calor de la unión de bitumen con DPET.



B. Sustitución área sólida

Debido a lo que se está viviendo actualmente con el COVID-19, no se pudieron llevar a cabo las pruebas físicas de estos escenarios.

Para realizar esta sustitución se requiere la elaboración de un prototipo a pequeña escala de asfalto modificado, para implementarlo se requiere de un lote de botellas PET, higienizadas con agua y jabón y sin etiquetas. Se debe cortar las botellas a la escala de media pulgada para que pueda cumplir con los requisitos de graduación determinados. Posteriormente, llevar el material a un laboratorio de asfalto y proseguir con la unión del bitumen, las sustitución en los diferentes porcentajes en el agregado y realización de la prueba MARSHALL para comprobar la unión de los materiales, el cumplimiento de los requisitos y concluir así con la factibilidad del proceso.

Como referencia se puede mencionar el proyecto Asfalto Verde trabajado en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la UCR en Costa Rica en el año 2018, quienes en conjunto con la compañía Coca Cola, incorporaron al proceso del asfalto mediante la vía sólida, botellas PET recicladas en una mezcla al 3%; obteniendo reportes de mejora demostrando ser resistente a la malformación, al agrietamiento y a la humedad.

C. Análisis económico

Se obtuvo los datos del total de costo diario de producción en los diferentes escenarios que se plantearon para la sustitución en área líquida del 10%, 25%, 30%, 35% y 50% en bitumen colocando DPET; así como en los escenarios en sustitución en área sólida del 10%, 25%, 30%, 35% y 50% en agregados del peso colocando PET triturado. Este total de costo de producción se elaboró tal y como se mencionó en la metodología, para una producción diaria de 100 toneladas de asfalto con los datos de materia prima, mano de obra directa y costos indirectos de fabricación.

Se utilizó la técnica de planificación de los requerimientos de material (MRP), la cual es un sistema de planificación y administración de los materiales para la producción, con el fin de mantener el orden y claridad de la descripción de los materiales a necesitar.

1. Sin modificación en el asfalto

Se realizó un análisis del total de costo de producción del asfalto sin modificación tomando en cuenta los materiales para la producción (MP), los operarios que trabajan de forma ya sea directa (MOD) o indirectamente (MOI) y el costo de la electricidad; siendo estos los costos indirectos de fabricación (CIF). Como se puede observar en la tabla No. 12 los materiales a utilizar son el bitumen, agregado y la electricidad; de todos estos, el material con más costo diario cuando se produce el asfalto es el bitumen, el cual tiene un costo de Q31,753.80.

Tabla No. 12 Costo y uso de materiales del asfalto sin modificación

Materiales	Tipo de material	Costo	Presentación	Uso diario	Costo diario del material
Bitumen	MP	Q21.17	Galón	1,500.00 gal de bitumen	Q31,753.80
Agregado	MP	Q140.00	m ³	88.95 m ³ de agregado	Q12,452.65
Electricidad	CIF	Q1.34	Kwh	50.00 Kwh	Q67.00
Total					Q44,273.45

Tabla No. 13 Salario de mano de obra del asfalto sin modificación

Operarios	Tipo de Mano de obra	Cantidad de colaboradores	Salario Mensual	Salario Diario	Prestaciones diarias	Salario diario incluyendo prestaciones	Total de salario
Gerente de planta	MOI	1	Q15,000.00	Q483.87	Q209.13	Q693.00	Q693.00
Secretaria de planta	MOI	1	Q3,500.00	Q112.90	Q48.80	Q161.70	Q161.70
Operador de planta	MOD	4	Q3,300.00	Q106.45	Q46.01	Q152.46	Q609.84
Laboratorista	MOD	1	Q5,000.00	Q161.29	Q69.71	Q231.00	Q231.00
Limpieza	MOI	2	Q3,075.10	Q99.20	Q42.87	Q142.07	Q284.14
Total							Q1,979.68

En la Tabla No. 13 se realizó una clasificación de los operarios con un impacto directo hacia la producción (MOD) y los que tienen un impacto indirecto (MOI), hacia la misma. Los operarios que no tienen un impacto directo son agregados al costo indirecto de fabricación (CIF). La mano de obra directa son los operadores de planta y los laboratoristas. El operador de planta tiene como meta trabajar en la producción del asfalto, mientras que el laboratorista realiza las revisiones de la calidad del mismo. Por otro lado están los colaboradores que tienen un impacto indirecto como lo son la secretaria de planta, el gerente de planta y el personal de limpieza; éstas son mano de obra indirecta ya que trabajan para la planta de producción pero no tienen una consigna específica sobre la realización del asfalto. Se colocó el salario mensual de todos los operarios realizando un desglose de lo que representa diariamente el costo en mano de obra incluyendo prestaciones de ley.

Tabla No. 14 Costo de producción diario del asfalto sin modificación

MP	Q44,206.45
MOD	Q840.84
CIF	Q1,205.84
Total del costo de producción diario	Q46,253.13

El costo total de producción sería de Q46,253.13 por 100 toneladas sin realizar ninguna modificación, los costos más altos se encuentran en la materia prima con un costo de Q44,206.45.

2. Sustitución en área líquida del 10% en bitumen

Para el análisis de sustitución en los escenarios del área líquida en bitumen y colocarle DPET se realizó el mismo proceso que el apartado anterior. Se puede observar que en la tabla de materiales ahora se encuentra PET triturado, etilenglicol y acetato de zinc. Se evidencia que el costo del PET triturado es elevado, pero esto se debe a que la venta de PET triturado es a partir de 500 kg.

Se puede observar que el uso diario del PET triturado, etilenglicol y acetato de zinc representa un excedente en existencia de estos productos. Además, el costo del bitumen diario ha disminuido a Q28,578.42 como se refleja en la Tabla No. 15 .

Tabla No. 15 Costo y uso de materiales con sustitución en área líquida del 10% en bitumen

Materiales	Tipo de material	Costo	Presentación	Uso diario	Costo diario de material
Bitumen	MP	Q21.17	Galón	1,350 gal de bitumen	Q28,578.42
Agregado	MP	Q140.00	m ³	88.95 m ³ de agregado	Q12,452.65
PET Triturado	MP	Q2,164.40	500 kg	56.78 kg PET triturado	Q2,164.40
Ethylene Glycol	MP	Q150.00	Galón	0.14 gal de EG	Q150.00
Acetato de Zinc	MP	Q290.00	kg	0.03 kg AZ	Q290.00
Electricidad	CIF	Q1.34	Kwh	419.52 Kwh	Q562.16
Total					Q44,197.63

Tabla No. 16 Salario asignados de mano de obra con sustitución en área líquida

Operarios	Tipo de Mano de obra	Cantidad de colaboradores	Salario Mensual	Salario Diario	Prestaciones diarias	Salario diario incluyendo prestaciones	Total de salario
Gerente de planta	MOI	1	Q15,000.00	Q483.87	Q209.13	Q693.00	Q693.00
Secretaria de planta	MOI	1	Q3,500.00	Q112.90	Q48.80	Q161.70	Q161.70
Operador de planta	MOD	4	Q3,300.00	Q106.45	Q46.01	Q152.46	Q609.84
Laboratorista	MOD	2	Q5,000.00	Q161.29	Q69.71	Q231.00	Q462.00
Limpieza	MOI	2	Q3,075.10	Q99.20	Q42.87	Q142.07	Q284.14
Total							Q2,210.68

En la Tabla No. 16 se agregó un laboratorista para la sustitución en área líquida del 10% en bitumen; con fines de verificación de calidad del asfalto únicamente, el otro estará encargado en la degradación del PET; ambos impactan directamente en la producción del asfalto por lo que son mano de obra directa.

Tabla No. 17 Costo de producción diario con sustitución en área líquida del 10% en bitumen

MP	Q43,635.47
MOD	Q1,071.84
CIF	Q1,701.00
Total del costo diario de producción	Q46,408.31

El total del costo diario de producción sustituyendo en área líquida del 10% en bitumen por DPET es de Q 46,408.31, el cual es más elevado por Q155.18 comparado a el escenario del asfalto sin modificar. Se puede observar que este escenario tiene uso mínimo y un excedente mayor de materiales como PET triturado, etilenglicol y acetato de zinc.

3. Sustitución en área líquida del 25% en bitumen

Tabla No. 18 Costo y uso de materiales con sustitución en área líquida del 25% en bitumen

Materiales	Tipo de material	Costo	Presentación	Uso diario		Costo diario de material
Bitumen	MP	Q21.17	Galón	1,125	gal de bitumen	Q23,815.35
Agregado	MP	Q140.00	m ³	88.95	m ³ de agregado	Q12,452.65
PET Triturado	MP	Q2,164.40	500 kg	354.84	kg PET triturado	Q2,164.40
Ethylene Glycol	MP	Q150.00	Galón	0.91	gal de EG	Q150.00
Acetato de Zinc	MP	Q290.00	kg	0.18	kg AZ	Q290.00
Electricidad	CIF	Q1.34	Kwh	419.52	KwH	Q562.16
Total						Q39,434.56

En la Tabla No. 18, el uso diario del PET triturado, etilenglicol y acetato de zinc aumenta comparado con el escenario de sustitución en área líquida del 10% en bitumen; por lo que los costos diarios de bitumen decaen ya que se requiere menos uso diario de este material. Los salarios de la mano de obra son expresados en la Tabla No. 16.

Tabla No. 19 Costo de producción diario con sustitución en área líquida del 25% en bitumen

MP	Q38,872.40
MOD	Q1,071.84
CIF	Q1,701.00
Total del costo diario de producción	Q41,645.24

El costo total diario de producción sustituyendo en área líquida el 25% en bitumen por DPET, es de Q41,645.24 como lo muestra la Tabla No. 19. Se evidencia también que es más económico que la producción sin modificar.

4. Sustitución en área líquida del 30% en bitumen

Tabla No. 20 Costo y uso de materiales con sustitución en área líquida del 30% en bitumen

Materiales	Tipo de material	Costo	Presentación	Uso diario	Costo diario del material
Bitumen	MP	Q21.17	Galón	1,050.00 gal de bitumen	Q22,227.66
Agregado	MP	Q140.00	m ³	88.95 m ³ de agregado	Q12,452.65
PET Triturado	MP	Q2,164.40	500 kg	510.98 kg PET triturado	Q4,328.80
Ethylene Glycol	MP	Q150.00	Galón	1.30 gal de EG	Q300.00
Acetato de Zinc	MP	Q290.00	kg	0.26 kg AZ	Q290.00
Electricidad	CIF	Q1.34	Kwh	419.52 Kwh	Q562.16
Total					Q40,161.27

Se puede observar en la Tabla No. 20 que el uso diario del PET triturado, etilenglicol y acetato de zinc está aumentado; esto se debe a que la presentación para la venta de este material es de 500 kg y en esta degradación se utiliza 510.98 kg de PET triturado, por lo que se requiere dos pedidos. Los salarios de la mano de obra son expresados en la Tabla No. 16.

Tabla No. 21 Costo de producción diario con sustitución en área líquida del 30% en bitumen

MP	Q39,599.11
MOD	Q1,071.84
CIF	Q1,701.00
Total del costo diario de producción	Q42,371.95n

Al comparar el costo total de producción de la sustitución en área líquida del 30% en bitumen con el costo total de producción sin modificar, se obtiene que es más económico por Q4,224.86. Este total del costo diario de producción es menos económico que el total del costo diario de producción con sustitución en área líquida del 25% en bitumen existiendo Q383.03 de diferencia, debido a que los pedidos de PET triturado y etilenglicol aumentaron. Por otro lado, existe un excedente de material haciendo dos pedidos de PET triturado.

5. Sustitución en área líquida del 35% en bitumen

A continuación, se puede observar que el uso diario del PET triturado, etilenglicol y acetato de zinc sigue siendo el mismo que en sustitución de área líquida del 35% en bitumen; esto se debe a que la presentación para la venta de este material es de 500 kg y en esta degradación se utiliza 695.49 kg de PET triturado, por lo que se requiere dos pedidos. Los materiales etilenglicol y acetato de zinc mantienen sus costos, porque se necesita más de un galón de etilenglicol lo que se requieren dos

galones y el acetato de zinc la presentación brindada por proveedores es por kilogramo.

Tabla No. 22 Costo y uso de materiales con sustitución en área líquida del 35% en bitumen

Materiales	Tipo de material	Costo	Presentación	Uso diario	Costo diario del material
Bitumen	MP	Q21.17	Galón	975.00 gal de bitumen	Q20,639.97
Agregado	MP	Q140.00	m ³	88.95 m ³ de agregado	Q12,452.65
PET Triturado	MP	Q2,164.40	500 kg	695.49 PET triturado	Q4,328.80
Ethylene Glycol	MP	Q150.00	Galón	1.77 gal de EG	Q300.00
Acetato de Zinc	MP	Q290.00	kg	0.35 kg AZ	Q290.00
Electricidad	CIF	Q1.34	Kwh	419.52 Kwh	Q562.16
Total					Q38,573.58

Tabla No. 23 Costo de producción diario con sustitución en área líquida del 35% en bitumen

MP	Q38,011.42
MOD	Q1,071.84
CIF	Q1,701.00
Total del costo diario de producción	Q40,784.26

La materia prima ha disminuido ya que se requiere de menos uso de bitumen que los escenarios anteriores. El costo total de producción es de Q40,784.26 como muestra la Tabla No. 23. Los salarios de la mano de obra son los expresados en la Tabla No. 16. Este costo es menor al costo total de producción del escenario sin ninguna modificación con Q5,468.87 de diferencia.

6. Sustitución en área líquida del 50% en bitumen

En la Tabla No. 24 se observa que el material de bitumen se redujo a la mitad y esta será sustituida por 1,419.38 kg de PET triturado. Aunque el uso diario del bitumen se reduce a la mitad, este sigue siendo el costo diario más elevado de la materia prima con Q15,876.90.

Tabla No. 24 Costo y uso de materiales con sustitución en área líquida del 50% en bitumen

Materiales	Tipo de material	Costo	Presentación	Uso diario	Costo diario del material
Bitumen	MP	Q21.17	Galón	750.00 gal de bitumen	Q15,876.90
Agregado	MP	Q140.00	m ³	88.95 m ³ de agregado	Q12,452.65
PET Triturado	MP	Q2,164.40	500 kg	1419.38 kg de PET triturado	Q6,493.20
Ethylene Glycol	MP	Q150.00	Galón	3.62 gal de EG	Q600.00
Acetato de Zinc	MP	Q290.00	kg	0.71 kg AZ	Q290.00
Electricidad	CIF	Q1.34	Kwh	419.52 Kwh	Q562.16
Total					Q36,274.91

Tabla No. 25 Costo de producción diario con sustitución en área líquida del 50% en bitumen

MP	Q35,712.75
MOD	Q1,071.84
CIF	Q1,701.00
Total del costo diario de producción	Q38,485.59

Como se observa en la Tabla No 25, el total del costo diario de producción obtenido modificando en área líquida el 50% del bitumen por DPET, es de Q38,485.59 comparando con el total del costo diario de producción de asfalto sin ninguna modificación el costo se redujo en Q7,767.54. Los salarios de la mano de obra son los expresados en la tabla No. 16. Sustituyendo en los diferentes porcentajes en el área líquida se puede observar que este escenario es el de menor costo debido a su reducción en los costo diarios del bitumen.

7. Resumen área líquida

En la siguiente tabla se puede observar de una forma resumida los costos que tienen más impacto en los diferentes escenarios planteados en el área líquida. Se puede comparar como el costo del bitumen y los costos de materia prima van descendiendo mientras que el costo del PET triturado va ascendiendo. Por esta razón se puede concluir que el mejor escenario es la sustitución en el área líquida del 50% en bitumen incorporando PET degradado ya que el total del costo diario de producción es menor que los demás escenarios. Cabe destacar que el costo más alto es sustituyendo en el área líquida del 10% en bitumen, esto se debe a que el costo de PET triturado es poco flexible ante las cantidades a utilizar y su presentación para la venta.

Tabla No. 26 Resumen del área líquida

Porcentaje	Costo diario de bitumen	Costo diario de PET triturado	Costo diario de Materia Prima	Total del costo diario de producción
Asfalto normal	Q31,753.80	N/A	Q44,206.45	Q46,253.13
10	Q28,578.42	Q2,164.40	Q43,635.47	Q46,408.31
25	Q23,815.35	Q2,164.40	Q38,872.40	Q41,645.24
30	Q22,227.66	Q4,328.80	Q39,599.11	Q42,371.95
35	Q20,639.97	Q4,328.80	Q38,011.42	Q40,784.26
50	Q15,876.90	Q6,493.20	Q35,712.75	Q38,485.59

8. Sustitución en área sólida del 10% en agregados

En la Tabla No. 27 se puede apreciar que los materiales son menos a diferencia de los escenarios en área líquida, ahora solamente se requiere de bitumen, agregado y PET triturado. Se puede observar que el costo del bitumen sigue siendo el dominante, luego le sigue el precio del PET triturado.

Tabla No. 27 Costo y uso de materiales diarios con sustitución en área sólida del 10% en agregados

Materiales	Tipo de material	Costo	Presentación	Uso diario	Costo diario de material
Bitumen	MP	Q21.17	Galón	1,500.00 gal de bitumen	Q31,753.80
Agregado	MP	Q140.00	m ³	84.50 m ³ de agregado	Q11,830.02
PET Triturado	MP	Q2,164.40	500 kg	5,915.01 kg PET triturado	Q25,972.80
Electricidad	CIF	Q1.34	Kwh	50.00 Kwh	Q67.00
Total					Q69,623.62

Tabla No. 28 Salario asignados de mano de obra con sustitución en área sólida

Operarios	Tipo de Mano de obra	Cantidad de colaboradores	Salario Mensual	Salario Diario	Prestaciones diarias	Salario diario incluyendo prestaciones	Total de salario
Gerente de planta	MOI	1	Q15,000.00	Q483.87	Q209.13	Q693.00	Q693.00
Secretaria de planta	MOI	1	Q3,500.00	Q112.90	Q48.80	Q161.70	Q161.70
Operador de planta	MOD	4	Q3,300.00	Q106.45	Q46.01	Q152.46	Q609.84
Laboratorista	MOD	1	Q5,000.00	Q161.29	Q69.71	Q231.00	Q231.00
Limpieza	MOI	2	Q3,075.10	Q99.20	Q42.87	Q142.07	Q284.14
Total							Q1,979.68

Se puede confirmar con la Tabla No. 28 el hecho de que ya no se requiere de dos laboratoristas, solamente uno; por lo que se reduce este rubro. Los demás operarios se mantienen en cantidad.

Tabla No. 29 Costo de producción diario con sustitución en área sólida del 10% en agregados

MP	Q69,556.62
MOD	Q840.84
MOI	Q1,205.84
Total del costo diario de producción	Q71,603.30

El total del costo diario de producción del asfalto con una sustitución en área sólida del 10% en agregados del material ½” es de Q71,603.30; por lo que al comparar al escenario de asfalto sin modificación, este aumentó Q25,350.17. Esto se debe a que se requieren de varios pedidos para el uso diario del PET triturado, lo que aumenta los costos diarios del material ya que la reducción del uso de los agregados no es notable.

9. Sustitución en área sólida del 25% en agregados

En la Tabla No. 30, se puede observar que los costos diarios del PET triturado han aumentado considerablemente comparado con los costos diarios del material de la Tabla No. 27 sobrepasando los costos diarios que se requieren del bitumen. También se redujo el costo de los agregados ya que se requiere sustituir un mayor porcentaje del material.

Tabla No. 30 Costo y uso de materiales diarios con sustitución en área sólida del 25% en agregados

Materiales	Tipo de material	Costo	Presentación	Uso diario	Costo diario de material
Bitumen	MP	Q21.17	Galón	1,500.00 gal de bitumen	Q31,753.80
Agregado	MP	Q140.00	m ³	77.83 m ³ de agregado	Q10,896.07
PET Triturado	MP	Q2,164.40	500 kg	14,787.52 kg PET triturado	Q64,932.00
Electricidad	CIF	Q1.34	Kwh	50.00 Kwh	Q67.00
Total					Q107,648.87

Tabla No. 31 Costo de producción diario con sustitución en área sólida del 25% en agregados

MP	Q107,581.87
MOD	Q840.84
MOI	Q1,205.84
Total del costo diario de producción	Q109,628.55

Es evidente que la diferencia del costo de producción diario sustituyendo en el área sólida del 25% en agregados del material $\frac{1}{2}$ " de los agregados es notable con la sustitución en área sólida del 10% en agregados desglosando Q38,025.25 de diferencia. Los salarios de la mano de obra son los expresados en la Tabla No. 28. La diferencia con el asfalto sin modificar es mayor por Q63,375.42 lo que significa más del doble del precio sin modificar la producción.

10. Sustitución en área sólida del 30% en agregados

El uso diario del PET triturado aumentó, por lo que la tendencia del costo diario del material aumentó de igual forma como se observa en la Tabla No. 32. El uso diario de los agregados tiene una disminución mínima por lo que el costo de este material es de Q10,584.75.

Tabla No. 32 Costo y uso de materiales diarios con sustitución en área sólida del 30% en agregados

Materiales	Tipo de material	Costo	Presentación	Uso diario	Costo diario de material
Bitumen	MP	Q21.17	Galón	1,500.00 gal	Q31,753.80
Agregado	MP	Q140.00	m ³	75.61 m ³	Q10,584.75
PET Triturado	MP	Q2,164.40	500 kg	17,745.03 kg	Q77,918.40
Electricidad	CIF	Q1.34	Kwh	50.00 Kwh	Q67.00
Total					Q120,323.95

Tabla No. 33 Costo de producción diario con sustitución en área sólida del 30% en agregados

MP	Q120,256.95
MOD	Q840.84
MOI	Q1,205.84
Total del costo diario de producción	Q122,303.63

El total del costo diario de producción con sustitución en área sólida del 30% en agregados del material $\frac{1}{2}$ ", tiene una diferencia de Q76,050.50 mayor en comparación con el total de costo diario de producción en el escenario sin modificación. Esto se debe a que los costos de materia prima han aumentado y superado los Q120,000.00 como se muestra en la Tabla No. 33 Los salarios de la mano de obra son los expresados en la Tabla No. 28.

11. Sustitución en área sólida del 35% en agregados

Los costos diarios del PET triturado siguen en aumento con Q90,904.80 como lo refleja la Tabla No. 34. Adicionalmente, los agregados siguen con una tendencia mínima disminuyendo su costo diario de material, por lo que se encuentra alrededor de los Q10,000.00.

Tabla No. 34 Costo y uso de materiales diarios con sustitución en área sólida del 35% en agregados

Materiales	Tipo de material	Costo	Presentación	Uso diario	Costo diario de material
Bitumen	MP	Q21.17	Galón	1500.00 gal	Q31,753.80
Agregado	MP	Q140.00	m ³	73.38 m ³	Q10,273.44
PET Triturado	MP	Q2,164.40	500 kg	20,702.53 kg	Q90,904.80
Electricidad	CIF	Q1.34	Kwh	50.00 Kwh	Q67.00
Total					Q132,999.04

Tabla No. 35 Costo de producción diario con sustitución en área sólida del 35% en agregados

MP	Q132,932.04
MOD	Q840.84
MOI	Q1,205.84
Total del costo diario de producción	Q134,978.72

Se puede observar que los costos de materia prima han aumentado a Q132,932.04 a consecuencia de esto, el total del costo de producción diaria sustituyendo en área sólida del 35% en agregados del material de ½'' por PET triturado es de Q134,978.72. Los salarios de la mano de obra son los expresados en la Tabla No. 28. Este total del costo diario de producción es mayor por Q67,081.59 contrastado al total de costo diario de producción en el escenario sin modificación en el asfalto.

12. Sustitución en área sólida del 50% en agregados

El uso diario del PET triturado es de 29,575.04 kg, lo que ha aumentado su costo diario a Q129,864.00, como se observa en la Tabla No. 36. Adicional a esto, los costos diarios del agregado descendieron a Q9,339.49 mientras que los costos del bitumen y la electricidad se mantienen idénticos a los diferentes escenarios en la sustitución del área sólida.

Tabla No. 36 Costo y uso de materiales diarios con sustitución del 50% en agregados

Materiales	Tipo material	Costo	Presentación	Uso diario	Costo diario de material
Bitumen	MP	Q21.17	Galón	1,500.00 gal	Q31,753.80
Agregado	MP	Q140.00	m ³	66.71 m ³	Q9,339.49
PET Triturado	MP	Q2,164.40	500 kg	29,575.04 kg	Q129,864.00
Electricidad	CIF	Q1.34	Kwh	50.00 Kwh	Q67.00
Total					Q171,024.29

Tabla No. 37 Costo de producción diario con sustitución en área sólida del 50% en agregados

MP	Q170,957.29
MOD	Q840.84
MOI	Q1,205.84
Total del costo diario de producción	Q173,003.97

El total del costo diario de producción en la sustitución en área sólida del 50% en agregados del material ½ de pulgada, ascendió a Q173,003.97. Los salarios de la mano de obra son los expresados en la Tabla No. 28. Una diferencia de Q126,750.84 con el escenario sin modificar el asfalto, siendo este el escenario con más amplia diferencia.

13. Resumen área sólida

La siguiente tabla contiene un resumen de los escenarios de la sustitución en el área sólida para poder comprender de una mejor manera los costos que tienen mayor impacto. Se puede observar que los costos diarios de agregado en los 5 escenarios solamente se redujeron en Q3,113.16 a comparación del asfalto sin modificar; mientras que el costo diario de PET triturado aumentó Q126,750.84 en los mismos escenarios comparado con el asfalto sin modificar. En consecuencia a esto, el costo diario de materia prima y el total del costo diario de producción tienen una tendencia ascendente.

Tabla No. 38 Resumen del área sólida

Porcentaje	Costo diario de agregado	Costo diario de PET triturado	Costo diario de Materia Prima	Total del costo diario de producción
Asfalto normal	Q12,452.65	N/A	Q44,206.45	Q46,253.13
10	Q11,830.02	Q25,972.80	Q69,556.62	Q71,603.30
25	Q10,896.07	Q64,932.00	Q107,581.87	Q109,628.55
30	Q10,584.75	Q77,918.40	Q120,256.95	Q122,303.63
35	Q10,273.44	Q90,904.80	Q132,932.04	Q134,978.72
50	Q9,339.49	Q129,864.00	Q170,957.29	Q173,003.97

B. Análisis de sensibilidad

Para realizar el análisis de sensibilidad se obtuvo un contexto similar al de la elaboración de los costos diarios de producción; con la variante de ser proyectados mensualmente en una caja de flujo en frecuencia de cinco veces a la semana y cien toneladas de asfalto diario. En la caja de flujo, en la columna “n” se encontrarán los números de meses que se analizarán, en la columna de inversión, en el mes 0 se colocó la inversión inicial que se requiere para realizar el primer mes de producción de asfalto y en los siguientes meses se colocó la anualidad.

En la columna del saldo del proyecto, se adjudicó el saldo con el que se cuenta para poder realizar la producción, también se hace referencia al ahorro, el cual es la diferencia del costo mensual de producción sin modificación con los costos mensuales de la producción modificando el asfalto. El capital es proyectado de esta forma como la diferencia del ahorro con la anualidad y en la columna de flujo se adjudicó la diferencia que existe entre el capital y el saldo del proyecto. Luego de realizar la caja de flujo se encuentra la TIR, con la fórmula de excel “IRR” ingresando los datos del flujo.

Por ejemplo, en la Tabla No. 39, en el mes 0 se colocó el préstamo de la inversión que se requiere para poder producir un mes de asfalto sin modificación; esta inversión es el costo de mano de obra, costos indirectos de fabricación y materia prima que se requiere para realizar un mes de producción del asfalto sin modificación produciendo diariamente 100 toneladas de asfalto cinco días por semana. Luego, en el siguiente mes se consignó en la columna de inversión la anualidad del préstamo. La anualidad se encontró a través de las fórmulas que brinda excel, “PMT”, para lo cual se ingresó la tasa de interés, la cual en este caso se calculó sobre el 4%, unido a la inversión del proyecto y el periodo del préstamo que se prolongará a un tiempo de 5 meses con el fin de concluir su tasa de retorno. Finalmente en cuanto al saldo del proyecto se obtuvo el flujo que tiene la producción con este rendimiento proyectado. Como se puede observar en la columna de ahorro la diferencia es de Q0.00, ya que esta es la producción que no sufrió modificación alguna.

El capital representó la diferencia que existe del ahorro con la anualidad, en este caso es la misma ya que no se evidenció ahorro. El flujo se determinó como la diferencia que tiene el saldo del proyecto con el capital. Así sucesivamente, se realizó la caja de flujo por 5 meses. Por último, se ingresó los datos del flujo a la función TIR, para obtener la tasa de retorno del proyecto planteado.

Tabla No. 39 Caja de flujo de asfalto sin modificación

Sin modificación					
n	Inversión	Saldo del proyecto	Ahorro	Capital	Flujo
0	-GTQ1,017,568.86				-GTQ1,017,568.86
1	GTQ228,573.56	GTQ1,017,568.86	GTQ-	GTQ228,573.56	GTQ788,995.30
2	GTQ228,573.56	GTQ788,995.30	GTQ-	GTQ228,573.56	GTQ560,421.75
3	GTQ228,573.56	GTQ560,421.75	GTQ-	GTQ228,573.56	GTQ331,848.19
4	GTQ228,573.56	GTQ331,848.19	GTQ-	GTQ228,573.56	GTQ103,274.64
5	GTQ228,573.56	GTQ103,274.64	GTQ-	GTQ228,573.56	GTQ-
				TIR	38.27%

Para el flujo de efectivo, de la tabla producción del asfalto sin modificación, se obtiene una inversión de Q1,017,568.86 con una anualidad de Q228,574.56. En el último mes, en la columna de flujo, no existe retorno por lo que se proyecta 0. Se obtiene un TIR de 38.27% para la producción de asfalto sin modificar.

Tabla No. 40 Caja de flujo de asfalto con sustitución en área líquida del 10% en bitumen

Sustitución del 10% en bitumen					
n	Inversión	Saldo del proyecto	Ahorro	Capital	Flujo
0	-GTQ1,020,982.82				-GTQ1,020,982.82
1	GTQ229,340.42	GTQ1,020,982.82	-GTQ3,413.96	GTQ232,754.38	GTQ788,228.44
2	GTQ229,340.42	GTQ788,228.44	-GTQ3,413.96	GTQ232,754.38	GTQ555,474.05
3	GTQ229,340.42	GTQ555,474.05	-GTQ3,413.96	GTQ232,754.38	GTQ322,719.67
4	GTQ229,340.42	GTQ322,719.67	-GTQ3,413.96	GTQ232,754.38	GTQ89,965.28
5	GTQ229,340.42	GTQ89,965.28	-GTQ3,413.96	GTQ232,754.38	GTQ-
				TIR	37.11%

En la caja de flujo sustituyendo en el área líquida del 10% en bitumen, se puede observar que el ahorro es negativo, ya que el costo de producción mensual de este es más elevado que el costo mensual de producción del asfalto sin modificar. El costo mensual de la mezcla de asfalto aumenta un 0.33% comparado al costo mensual de la producción del asfalto sin modificar. En el último mes, en la columna de flujo, no existe retorno. Con esta sustitución se obtiene un TIR de 37.11%.

Tabla No. 41 Caja de flujo de asfalto con sustitución en área líquida del 25% en bitumen

Sustitución del 25% en bitumen					
n	Inversión	Saldo del proyecto	Ahorro	Capital	Flujo
0	-GTQ916,195.28				-GTQ916,195.28
1	GTQ205,802.30	GTQ916,195.28	GTQ101,373.58	GTQ104,428.72	GTQ811,766.56
2	GTQ205,802.30	GTQ811,766.56	GTQ101,373.58	GTQ104,428.72	GTQ707,337.84
3	GTQ205,802.30	GTQ707,337.84	GTQ101,373.58	GTQ104,428.72	GTQ602,909.12
4	GTQ205,802.30	GTQ602,909.12	GTQ101,373.58	GTQ104,428.72	GTQ498,480.40
5	GTQ205,802.30	GTQ498,480.40	GTQ101,373.58	GTQ104,428.72	GTQ394,051.67
				TIR	71.64%

Se puede observar que la anualidad de la caja de flujo sustituyendo en área líquida del 25% en bitumen por DPET es de Q205,802.30; con un ahorro de Q101,373.58, lo que representa un ahorro del 9.96% menos, comparado con el costo mensual del asfalto sin modificar. Esto aumenta la TIR a un 71.64% siendo mayor que los escenarios sustituyendo en área líquida del 10% en bitumen y sin modificar el asfalto.

Tabla No. 42 Caja de flujo de asfalto con sustitución en área líquida del 30% en bitumen

Sustitución del 30% en bitumen					
n	Inversión	Saldo del proyecto	Ahorro	Capital	Flujo
0	-GTQ924,621.94				-GTQ924,621.94
1	GTQ207,695.16	GTQ924,621.94	GTQ92,946.92	GTQ114,748.24	GTQ809,873.70
2	GTQ207,695.16	GTQ809,873.70	GTQ92,946.92	GTQ114,748.24	GTQ695,125.47
3	GTQ207,695.16	GTQ695,125.47	GTQ92,946.92	GTQ114,748.24	GTQ580,377.23
4	GTQ207,695.16	GTQ580,377.23	GTQ92,946.92	GTQ114,748.24	GTQ465,628.99
5	GTQ207,695.16	GTQ465,628.99	GTQ92,946.92	GTQ114,748.24	GTQ350,880.75
TIR					69.08%

Se obtiene una TIR de 69.08% al realizar la caja de flujo sustituyendo en el área líquida del 30% en bitumen en la producción mensual del asfalto, esta TIR es menor que la TIR de la producción mensual del asfalto sustituyendo en área líquida del 25% en bitumen por DPET. Se tiene un ahorro del 9.13% comparado al costo mensual del asfalto sin modificar.

Tabla No. 43 Caja de flujo de asfalto con sustitución en área líquida del 35% en bitumen

Sustitución del 35% en bitumen					
n	Inversión	Saldo del proyecto	Ahorro	Capital	Flujo
0	-GTQ897,253.72				-GTQ897,253.72
1	GTQ201,547.51	GTQ897,253.72	GTQ120,315.14	GTQ81,232.37	GTQ816,021.35
2	GTQ201,547.51	GTQ816,021.35	GTQ120,315.14	GTQ81,232.37	GTQ734,788.97
3	GTQ201,547.51	GTQ734,788.97	GTQ120,315.14	GTQ81,232.37	GTQ653,556.60
4	GTQ201,547.51	GTQ653,556.60	GTQ120,315.14	GTQ81,232.37	GTQ572,324.23
5	GTQ201,547.51	GTQ572,324.23	GTQ120,315.14	GTQ81,232.37	GTQ491,091.85
TIR					77.29%

La inversión de la caja de flujo con sustitución en área líquida del 35% en bitumen es de Q897,253.72; con una anualidad de Q201,547.51. También se obtiene

un ahorro del 11.82% comparando al costo mensual del asfalto sin modificar, lo que hace que el TIR se eleve a 77.29%, siendo mayor que los escenarios sustituyendo en el área líquida del 10%, 25% y 30% en bitumen.

Tabla No. 44 Caja de flujo de asfalto con sustitución en área líquida del 50% en bitumen

Sustitución del 50% en bitumen					
n	Inversión	Saldo del proyecto	Ahorro	Capital	Flujo
0	-GTQ846,682.98				-GTQ846,682.98
1	GTQ190,187.95	GTQ846,682.98	GTQ170,885.88	GTQ19,302.07	GTQ827,380.91
2	GTQ190,187.95	GTQ827,380.91	GTQ170,885.88	GTQ19,302.07	GTQ808,078.83
3	GTQ190,187.95	GTQ808,078.83	GTQ170,885.88	GTQ19,302.07	GTQ788,776.76
4	GTQ190,187.95	GTQ788,776.76	GTQ170,885.88	GTQ19,302.07	GTQ769,474.68
5	GTQ190,187.95	GTQ769,474.68	GTQ170,885.88	GTQ19,302.07	GTQ750,172.61
TIR					92.03%

La inversión de la producción mensual del asfalto sustituyendo en área líquida del 50% en bitumen por DPET, es la menor de todos los escenarios con Q846,682.98, con un ahorro del 16.79% comparado al costo mensual de la producción sin modificar y una anualidad de Q190,187.95; esto hace que la caja de flujo tenga un TIR de 92.03% siendo la mayor de los escenarios en el área líquida.

Tabla No. 45 Caja de flujo de asfalto con sustitución en área sólida del 10% en agregados

Sustitución del 10% en agregado					
n	Inversión	Saldo del proyecto	Ahorro	Capital	Flujo
0	GTQ1,575,272.60				-GTQ1,575,272.60
1	GTQ353,848.94	GTQ1,575,272.60	-GTQ502,622.56	GTQ856,471.50	GTQ718,801.10
2	GTQ353,848.94	GTQ718,801.10	-GTQ502,622.56	GTQ856,471.50	GTQ-
3	GTQ353,848.94	GTQ137,670.39	-GTQ502,622.56	GTQ856,471.50	GTQ-
4	GTQ353,848.94	GTQ718,801.11	-GTQ502,622.56	GTQ856,471.50	GTQ-
5	GTQ353,848.94	GTQ137,670.39	-GTQ502,622.56	GTQ856,471.50	GTQ-
TIR					-54.37%

En la caja de flujo sustituyendo en área sólida del 10% en agregado se puede observar que el ahorro es negativo ya que el costo de producción mensual de este es más elevado por un 54.81% que el costo de producción mensual del asfalto sin

modificar. En los últimos cuatro meses en la columna de flujo, no existe retorno ya que la diferencia es negativa. Con esta sustitución se obtuvo un TIR de -54.37%.

Tabla No. 46 Caja de flujo de asfalto con sustitución en área sólida del 25% en agregados

Sustitución del 25% en asfalto					
n	Inversión	Saldo del proyecto	Ahorro	Capital	Flujo
0	-GTQ2,411,828.10				-GTQ2,411,828.10
1	GTQ541,761.98	GTQ2,411,828.10	-GTQ1,394,259.24	GTQ1,936,021.22	GTQ475,806.88
2	GTQ541,761.98	GTQ475,806.88	-GTQ1,394,259.24	GTQ1,936,021.22	GTQ-
3	GTQ541,761.98	GTQ1,350,051.99	-GTQ1,394,259.24	GTQ1,936,021.22	GTQ-
4	GTQ541,761.98	GTQ530,888.05	-GTQ1,394,259.24	GTQ1,936,021.22	GTQ-
5	GTQ541,761.98	GTQ1,350,051.99	-GTQ1,394,259.24	GTQ1,936,021.22	GTQ-
TIR					-80.27%

Se tiene una inversión inicial de Q2,411,828.10 para realizar la producción mensual del asfalto sustituyendo en el área sólida en un 25% en agregados con una anualidad de Q541,761.00. El ahorro se evidencia negativo ya que el costo de la producción con la modificación es 137.02% mayor que el costo de producción del asfalto sin modificar, lo cual obtiene una TIR de -80.27%.

Tabla No. 47 Caja de flujo de asfalto con sustitución en área sólida del 30% en agregados

Sustitución del 30% en agregados					
n	Inversión	Saldo del proyecto	Ahorro	Capital	Flujo
0	-GTQ2,690,679.86				-GTQ2,690,679.86
1	GTQ604,399.65	GTQ2,690,679.86	-GTQ1,673,111.00	GTQ2,277,510.65	GTQ413,169.21
2	GTQ604,399.65	GTQ413,169.21	-GTQ1,673,111.00	GTQ2,277,510.65	GTQ-
3	GTQ604,399.65	GTQ1,754,179.08	-GTQ1,673,111.00	GTQ2,277,510.65	GTQ-
4	GTQ604,399.65	GTQ468,250.39	-GTQ1,673,111.00	GTQ2,277,510.65	GTQ-
5	GTQ604,399.65	GTQ1,754,179.08	-GTQ1,673,111.00	GTQ2,277,510.65	GTQ-
TIR					-84.64%

El costo de producción mensual sustituyendo en área sólida del 30% en el agregado del material ½’’ por PET triturado es mayor en un 164.42% comparado con el costo de la producción mensual en el escenario sin modificar el asfalto. En los últimos cuatro meses no se obtuvo un retorno en el flujo y se obtiene una TIR de -84.64%.

Tabla No. 48 Caja de flujo de asfalto con sustitución en área sólida del 35% en agregados

Sustitución del 35% en agregados					
n	Inversión	Saldo del proyecto	Ahorro	Capital	Flujo
0	-GTQ2,969,531.84				-GTQ2,969,531.84
1	GTQ667,037.37	GTQ2,969,531.84	-GTQ1,951,962.98	GTQ2,619,000.35	GTQ350,531.49
2	GTQ667,037.37	GTQ350,531.49	-GTQ1,951,962.98	GTQ2,619,000.35	GTQ-
3	GTQ667,037.37	GTQ2,158,306.49	-GTQ1,951,962.98	GTQ2,619,000.35	GTQ-
4	GTQ667,037.37	GTQ405,612.68	-GTQ1,951,962.98	GTQ2,619,000.35	GTQ-
5	GTQ667,037.37	GTQ2,158,306.49	-GTQ1,951,962.98	GTQ2,619,000.35	GTQ-
TIR					-88.20%

Se obtiene una anualidad de Q667,037.37 para la sustitución en el área sólida del 35% en agregados colocando PET triturado. La diferencia del costo de la producción mensual del escenario sin modificar el asfalto es del 191.83% siendo mayor este escenario lo hace negativa la columna del ahorro ya que se tienen más gastos y no ahorro. No se obtuvo retorno en los últimos 4 meses y como consecuencia se obtiene una TIR de -88.20%.

Tabla No. 49 Caja de flujo de asfalto con sustitución en área sólida del 50% en agregados

Sustitución del 50% en agregados					
n	Inversión	Saldo del proyecto	Ahorro	Capital	Flujo
0	-GTQ3,806,087.34				-GTQ3,806,087.34
1	GTQ854,950.41	GTQ3,806,087.34	-GTQ2,788,518.48	GTQ3,643,468.89	GTQ162,618.45
2	GTQ854,950.41	GTQ162,618.45	-GTQ2,788,518.48	GTQ3,643,468.89	GTQ-
3	GTQ854,950.41	GTQ3,370,688.09	-GTQ2,788,518.48	GTQ3,643,468.89	GTQ-
4	GTQ854,950.41	GTQ217,699.62	-GTQ2,788,518.48	GTQ3,643,468.89	GTQ-
5	GTQ854,950.41	GTQ3,370,688.09	-GTQ2,788,518.48	GTQ3,643,468.89	GTQ-
TIR					-95.73%

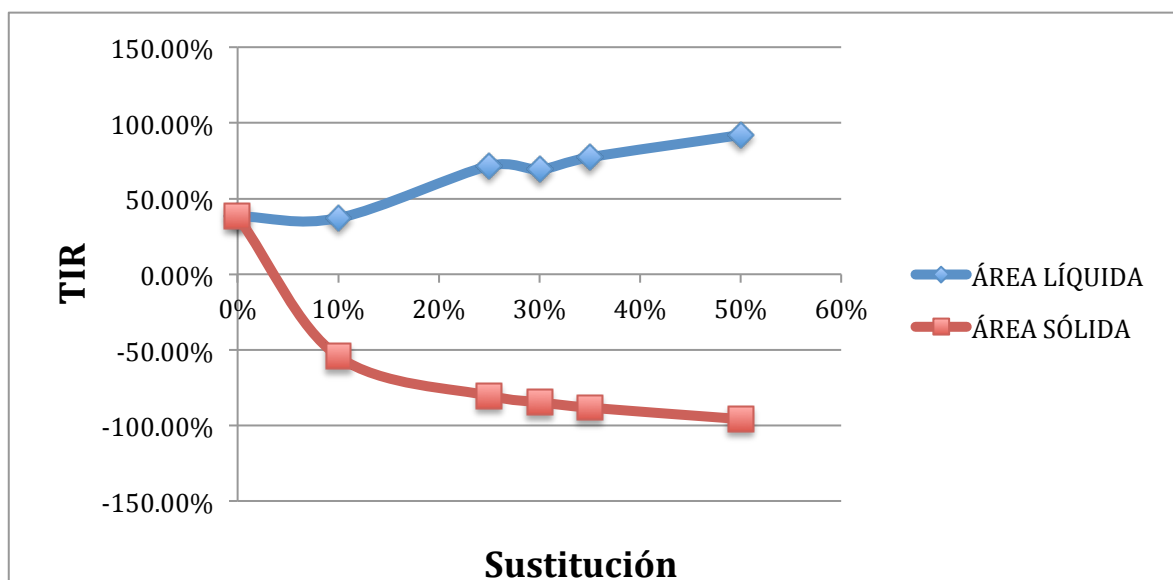
Para la producción en la sustitución en área sólida del 50% en agregados del material de media pulgada reemplazando con PET triturado, se obtuvo una inversión de Q3,806,087.34 con una anualidad de Q854,950.41. Marcando una diferencia mayor del costo de producción mensual en un 274.04% con el escenario del asfalto

sin modificar, lo que proyecta una TIR de -95.73% siendo la mayor de todos los escenarios.

Tabla No. 50 Resultados del TIR de los diferentes escenarios tanto como en área líquida como sólida

TIR		
Porcentaje de sustitución	Área líquida	Área sólida
0%	38.27%	38.27%
10%	37.11%	-54.37%
25%	71.64%	-80.27%
30%	69.08%	-84.64%
35%	77.29%	-88.20%
50%	92.03%	-95.73%

Imagen No. 14 Gráfica de sensibilidad de los diferentes escenarios.



Como resultados de la TIR en diferentes escenarios, se puede apreciar que en el área líquida al incrementar la sustitución el porcentaje de la TIR aumenta. Además al sustituir un 50% en el área líquida se tiene el mayor porcentaje de la tasa interna de retorno por lo tanto la convierte en el escenario más rentable. Por otro lado podemos observar que en el área sólida a mayor porcentaje de sustitución, el porcentaje de la TIR va decayendo, por lo que no es rentable realizar estos escenarios.

En la gráfica de la Imagen No. 14, se puede apreciar con una mayor claridad las tendencias que las áreas poseen. La tendencia del área sólida, es a descender desde el primer escenario y la sostiene hasta el último escenario con una TIR de -95.73%. Al contrario del área líquida, ya que está tiene una tendencia ascendente. En el escenario con una sustitución del 30% en el área líquida existe la tendencia a descender pero luego esta cambia en ascenso hasta llegar a una TIR de 92.03%.

VII. Discusión

Como parte de las observaciones directas realizadas en el presente proyecto se formulan varios planteamientos de discusión, partiendo del punto en el cual se establece que el material PET se logra degradar tal y como se puede hacer referencia en los análisis espectro realizados que se encuentran en las imágenes. No. 8, 9 y 10; esto permitió que el material pudiera ser manipulado en un estado líquido. En consecuencia, se logra mezclar el DPET con el bitumen, sin embargo cuando se expuso a altas temperaturas los materiales se separaron. Lo anteriormente mencionado pudo ser causado por varios factores, uno de ellos pudo ser el solvente utilizado el cual en este caso fue etilenglicol; ya que se trata de un material con una viscosidad alta para la mezcla del asfalto es incapaz de unirse porque no se redujo su viscosidad en su totalidad (Delgado, 2011). Otro factor de influencia en el mismo aspecto pudo ser el que las pruebas de mezcla del DPET con el bitumen no se llevaron a cabo en una planta exclusiva de producción de asfalto, situación que probablemente marcó la diferencia. Es importante mencionar que esta prueba de calor no se había realizado anteriormente a una mezcla de bitumen con PET degradado. La prueba física en la sustitución en el área sólida no se llevó a cabo por la interrupción de las actividades derivadas de los cierres por Covid-19; ya que incluso varios proveedores contactados se encontraban en suspensión de actividades y el único dato recibido fue el de un proveedor que ofrece material triturado solamente en la medida de media pulgada. Estas dos situaciones que se presentaron en ambas pruebas no detuvieron la elaboración de los diferentes análisis económicos para lo cual se plantearon distintos escenarios y tablas de datos con las pruebas que fue posible realizar tanto en líquido como en la planificación de la prueba en sólido con la información obtenida para cumplir con las metas de investigación y de impacto del proyecto.

La producción de la prueba sólida se trabajaría casi de la misma manera que en un proceso del asfalto sin modificación, uniendo el bitumen con los agregados, añadiendo una fase más al proceso que es la adicción del PET triturado, con esto ya se podría proseguir en el proceso y realizar las pruebas MARSHALL que se requieren para la mezcla del asfalto y poder obtener la factibilidad del proyecto en el área sólida. Esta sustitución de material pudo haber sido factible ya que en otros países se ha logrado realizar sustituciones en esta área e implementado pruebas piloto para su uso.

Las empresas que están desarrollando esta producción en otros países, cuentan con diferentes formas de apoyo de parte del gobierno o de empresas dedicadas al PET, así como de laboratorios especializados para la producción del asfalto. Las mezclas utilizadas para los planes piloto en otros países cuentan con un 3% del peso del asfalto en plástico triturado pasando por distintas pruebas que respaldan que el asfalto es resistente a malformaciones, agrietamientos y humedad. Conociendo esta información, en el presente proyecto no solo se consideró la sustitución con PET triturado, sino también la viabilidad que esta innovación tiene para poderse expandir y lograr abarcar más escenarios; por lo que se decidió llevar a cabo una prueba en líquido degradando el PET.

Tomando en cuenta los distintos escenarios para ambas áreas, sustituyendo un 10%, 25%, 30%, 35% y 50% en el área sólida el material de ½” implementando PET triturado y en el área líquida sustituyendo el material de bitumen, se puede observar en los resultados que en el área líquida de mayor impacto fue modificando el 50% del bitumen por PET degradado, llegando a tener un ahorro diario de Q7,767.54 en el costo de producción. El fundamento de este resultado se infiere al conocer que el bitumen es el material más costoso del uso diario del asfalto y con esta variación, se reduce los costos a la mitad ya que el costo que tiene degradar el PET es menor a lo que se sustituye, aunque se elevaran los costos de mano de obra directa y los costos indirectos de fabricación, el ahorro persiste; ese es un hallazgo interesante y considerablemente positivo.

De igual manera se denota un ahorro en distintas escalas sustituyendo 35%, 30% y 25% cuando se comparan los costos totales de producción. Un dato que llama la atención al sustituir en un 30% y 25% es que se obtiene un menor costo de la producción al sustituir 25% de bitumen por DPET como consecuencia a que en la sustitución del 30% se requiere dos pedidos de PET triturado por temas relativos a venta de medida mínima del proveedor, existiendo así material excedente. Lo mismo ocurre con los materiales de etilenglicol y acetato de zinc ya que los proveedores los venden por galón y kilogramo respectivamente. Al realizar el análisis en estos porcentajes es claramente evidente que sustituir un 10% del bitumen y reemplazarlo con DPET no es conveniente, ya que los costos de producción incluso del asfalto sin modificar por la poca cantidad necesaria y la compra mínima requerida por los proveedores.

En otro tipo de ejercicio, sin modificar los porcentajes de bitumen pero si modificando el material de ½” que se le coloca al asfalto, se obtienen diferentes resultados en todos los escenarios con el factor común de un costo de producción más alto comparado al del asfalto sin modificar. El motivo principal es que la sustitución que se realiza en los agregados es mínima y no llega a impactar al uso del material ni a los costos de una manera relevante, sino que al contrario, resulta en una producción más costosa y con poca intervención. Otro factor el cual puede influir es que la trituración del PET, ya que es tercerizado, por lo que se depende de una empresa.

El haber realizado este análisis permite tener un panorama completo en cuanto a lo que la ejecución de este proyecto implica y significa para nuestro país; ya que como se menciona anteriormente, en otros países pioneros se han reportado beneficios múltiples con esta innovación, el reto ahora es lograr comprobar el impacto que este tipo de proyecto de la ingeniería tendría en Guatemala y en la cotidianidad de los guatemaltecos. Aunque no se haya logrado comprobar para la sustitución en el área sólida y en el área líquida los materiales no se unieron por completo, este análisis nos permite establecer una planificación de los requerimientos de material (MRP) para futuros proyectos. En el caso de la sustitución en el área líquida, el poder sustituir el etilenglicol con otro químico que ayude a que el PET triturado se pueda degradar y unir al bitumen. También para el área sólida, el poder realizar las pruebas correspondientes para obtener la factibilidad del proyecto y de llegarse a requerir alguna modificación.

Con los resultados obtenidos del TIR se puede enmarcar la viabilidad o no viabilidad de que representa realizar este el proyecto. A través del análisis del TIR para cada uno de los escenarios y tomando como referencia el TIR de producción sin ninguna modificación, el cual fue de 38.27% se concluye que si este aumenta significa que existe un beneficio tangible modificando la producción del asfalto, sin embargo si esta descende significa que hay una pérdida en el costo de producción del asfalto.

Se puede apreciar en la Imagen No. 14 en la cual se compara el TIR del asfalto sin modificar con los demás el escenarios, que el que mejor proyección tiene es el de la sustitución en área líquida del 50% del bitumen, ya que según la gráfica, esta beneficia los costos de producción del material, llegando a tener un TIR del 92.03%. Adicionalmente, los escenarios sustituyendo el 25%, 30%, 35% del área líquida, también se encuentran por encima del TIR del asfalto sin modificar, por lo que también se puede concluir que son proyectos rentables y que traen un beneficio a los costos de producción del mismo. Se puede observar que la TIR del área líquida en sustitución del 25% está por encima del 30%, por lo que hace que esta sustitución sea un escenario más viable. Por otro lado, el escenario del 10% de la TIR en el área líquida es levemente menor al escenario del asfalto sin modificar, lo que hace que no beneficie los costos de la producción del asfalto y que no represente ninguna rentabilidad.

En la TIR del área sólida, se puede observar que desde un inicio se tiene una tendencia en declive por lo que ningún escenario de esta área es rentable.

Tabla No. 51 Porcentajes de PET que se puede llegar a aprovechar en los escenarios del área líquida

Porcentaje a sustituir en área líquida	kg de PET triturado a utilizar	Porcentaje de PET que se puede llegar a aprovechar
10.00%	12,528.84	0.02%
25.00%	78,297.55	0.11%
30.00%	112,750.77	0.16%
35.00%	153,355.87	0.22%
50.00%	313,194.62	0.46%

Tabla No. 52 Porcentajes de PET que se puede llegar a aprovechar en los escenarios del área sólida

Porcentaje a sustituir en área sólida	kg de PET triturado a utilizar	Porcentaje de PET que se puede llegar a aprovechar
10.00%	652,591.03	0.95%
25.00%	1,631,477.02	2.38%
30.00%	1,957,773.09	2.86%
35.00%	2,284,068.05	3.34%
50.00%	3,262,954.04	4.77%

Con la metodología empleada en este proyecto y tomando como válidos los datos que se tienen de la INE en cuanto al material que se desecha en el vertedero de basura de la zona 3 en la Ciudad de Guatemala y las cifras del consumo anual de asfalto que se obtuvieron del año 2018 según las estadísticas de hidrocarburos en Guatemala, se establecen datos que nos proyecta cuánto porcentaje de PET se puede llegar a aprovechar en proyectos asfálticos.

En la Tabla No. 51, se revela que lo máximo que se puede aprovechar del PET que se encuentra en el vertedero de basura de la zona 3 en la Ciudad de

Guatemala es un 0.46%, cuando se sustituye en área líquida del 50% del bitumen nacional consumido en el asfalto en el año 2018.

El mínimo porcentaje de PET que se puede llegar a aprovechar es de 0.02%, cuando se sustituye en el área líquida un 10% del bitumen nacional consumido de igual forma en el 2018.

Por otro lado, en el área sólida se puede llegar a aprovechar un máximo de 4.77% de PET cuando se sustituye en área sólida del 50% del agregado en el material de media pulgada y se reemplaza con PET triturado y lo mínimo que se puede llegar a aprovechar de PET sustituyendo en el área sólida es un 0.95%.

A partir de todo el análisis se estableció que el seguimiento de la diagramación del proceso de producción tiene que ser constante y llevado a cabo en el orden planteado sin cambio alguno. Aunque no se logró obtener la factibilidad del proyecto si se pudo implementar la técnica de planificación de los materiales (MRP), lo cual es de suma importancia ya que esta nos indica cuánto material se requiere para la producción del asfalto, ya sea con o sin modificación.

El haber obtenido la factibilidad resultó beneficioso para mantener el control y estandarización de los materiales y a la vez optimizar recursos .

Por último, el haber tenido la experiencia de realizar estos estudios, análisis y pruebas permite enfocar todos los esfuerzos de este proyecto hacia objetivos de desarrollo sostenible, considerando que enmarca dentro de varios de dichos objetivos como lo son: Industria, Innovación e Infraestructura, Ciudades y Comunidades sostenibles, así como con la Producción y Consumo Responsables.

VIII. Conclusiones

1. A través de un sistema de reflujo y de exposición a altas temperaturas se degradó el PET con el fin de obtenerlo en un estado líquido para ser añadido al proceso de la mezcla de asfalto para la vía líquida, pero sus componentes se aislaron; por lo cual se concluye que no es factible técnicamente.
2. Se puede y es viable añadir botellas PET al proceso de la mezcla de asfalto para la vía seca sustituyendo agregados en los tamices en porcentajes de 10%, 25%, 30%, 35% y 50%, utilizando el tamiz de media pulgada debido a los proveedores de trituración de PET disponibles. No se pudo comprobar su factibilidad técnica, pero existen referencias de países cercanos a Guatemala, específicamente Costa Rica con el proyecto Asfalto Verde, involucrando las botellas PET con éxito en un 3% a la mezcla del asfalto mediante la vía sólida en el año 2018.
3. De los diferentes escenarios planteados para el proceso de la producción del asfalto sustituyendo al 10%, 25%, 30%, 35% y 50% en el área líquida, los resultados con márgenes positivos son a partir del escenario el 25% con ahorros mensuales desde Q92,946.92 hasta Q170,885.88, lo cual es económicamente viable ya que reduce el costo mensual de la producción del asfalto. Por otro lado, en los escenarios planteados para el proceso de la producción de asfalto sustituyendo al 10%, 25%, 30%, 35% y 50% en el área sólida no se refleja ningún ahorro mensual, sino que pérdidas desde Q3,413.96 hasta Q2,788,518.48, por lo que económicamente no es viable ya que elevan los costos mensuales de producción del asfalto el cual no lo hace rentable.
4. Mediante un análisis de sensibilidad se determinó que los escenarios sustituyendo el área líquida en 25%, 30%, 35% y 50% del bitumen y reemplazando con PET degradado traen beneficios a los costos de producción del asfalto, con ahorros mensuales desde un 9.13% hasta 16.79%. De igual forma se concluye que sustituyendo el área líquida en 10% del bitumen y en el área sólida en 10%, 25%, 30%, 35% y 50% en los agregados, no se obtiene beneficios a los costos de producción del asfalto, se tienen pérdidas desde un 0.33% hasta 274.04%.
5. Con la metodología empleada en el presente proyecto, se puede aprovechar desde un 0.02% hasta un 4.77% del PET que se desecha en el vertedero de basura de la zona 3 de la ciudad de Guatemala anualmente.
6. La herramienta de planificación de materiales requeridos (MRP) ayuda a encontrar la factibilidad del proyecto estableciendo los materiales a necesitar y cotizando el costo de estos.

7. El estudio realizado a través de este proyecto permite enfatizar la importancia de los objetivos de desarrollo sostenible dentro del marco de los objetivos #9 Industria, Innovación e Infraestructura, #11 Ciudades y Comunidades Sostenibles y #12 Producción y Consumo Responsables.
8. A través de este proyecto se logró comprobar que no es factible técnicamente involucrar las botellas de polietileno de tereftalato (PET) mediante la vía líquida, pero es factible económicamente.
9. Se logró comprobar que no es factible económicamente involucrar PET mediante la vía seca pero sí se ha comprobado la factibilidad técnica.

IX. Recomendaciones

1. Se recomienda encontrar un solvente capaz de degradar el PET y al mismo tiempo logre adherirse con el bitumen soportando altas temperaturas.
2. Se recomienda realizar las pruebas del área líquida sustituyendo más porcentaje de bitumen para saber si es factible el proyecto y a la vez poder obtener un mayor aprovechamiento de material PET que se desecha.
3. Se recomienda realizar la factibilidad en la producción del área sólida sin tercerizar la trituración del PET y de esta forma poder reducir los costos de materiales del proyecto.
4. Debido a que este proyecto se realizó exclusivamente en el proceso de producción del asfalto, se recomienda realizar un análisis de todo el proceso abarcando desde la obtención de los materiales para la producción hasta la instalación del producto.
5. Es imperante construir infraestructuras resilientes que promuevan la industrialización inclusiva y fomenten la innovación. El reciclaje promueve que las personas mantengan una actitud resiliente para su comunidad y por lo tanto una cultura de innovación constante.
6. En Guatemala es necesario garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles instando a las industrias a reciclar y reducir los desechos y utilizarlos en proyectos de beneficio para los ciudadanos.
7. Fomentar un cambio de cultura en los guatemaltecos a través de iniciativas similares a la planteada en el presente proyecto ya que implican una mejora en la calidad de vida de las personas al cuidar el medio ambiente y a la vez implementar innovación en la infraestructura de la ciudad.

X. Bibliografía

- Alzuhairi, Mohammed & Al-Ghaban, Ahmed & Almutalabi, Shams. (2018). *Chemical recycling of polyethylene terephthalate (waste water bottles) for improving the properties of asphalt mixture*. *MATEC Web of Conferences*. 162. 01042. 10.1051/mateconf/201816201042. xture.
- Becker, Y., Méndez, M. y Rodríguez, Y. (2001) *Polymer modified asphalt Vision Tecnologica*, pg. 39-50.
- COLOMO RUIZ, Nelson Rolando. Ingeniería del Reciclado en Envases de Tereftalato de Polietileno (PET). *Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala*, 2013. 18 p
- Cox, P. 2015. *Manual de laboratorio para estudiantes para el desarrollo de ensayos en concreto asfáltico en caliente*. Tesis Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala. 174 págs.
- Dirección General de Hidrocarburos. 2018. *Estadísticas de Hidrocarburos Guatemala, año 2018*. Ministerio de Energías y Minas. Guatemala. 37 págs.
- Delgado, J. (2011) *Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano*. Pg 33
- INGENIEROS CONSULTORES DE CENTRO AMERICA, S. A. (2001). *ESPECIFICACIONES GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES. DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS MINISTERIO DE COMUNICACIONES, INFRAESTRUCTURA Y VIVIENDA REPÚBLICA DE GUATEMALA*
- Juárez N, Mariana; Santiago J, María E.; Vera M, Jesús *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA MANUFACTURA DE EMPUÑADURAS DE PET RECICLADO e-Gnosis*, vol. 9, 2011, pp. 1-12 Universidad de Guadalajara. Guadalajara, México
- Lett, Lina A. (2014) *Las amenazas globales, el reciclaje de residuos y el concepto de economía circular* *Revista Argentina de Microbiología*, vol. 46, núm. 1, 2014, pp. 1-2 Asociación Argentina de Microbiología, Buenos Aires, Argentina
- Ortiz, Brayan. (2017) *Mezclas asfálticas en caliente adicionando tereftalato de polietileno como agregado por el método marshall*.
- Ortiz, I. 2018. *Estudio de Factibilidad para Planta de Reciclado de Residuos de Plástico PET Consultado*. Pág 41.

- PROLAB. 2020. *Parrilla de Calentamiento y Agitación* Consultado el: 6 de mayo de 2020. Disponible en: <https://prolab.com.gt/product-iq/parrilla-de-calentamiento-y-agitacion/>
- Universidad de Costa Rica. (2018) *El LanammeUCR elabora asfalto con sostenibilidad ambiental.* Disponible en: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/07/10/el-lanammeucr-elabora-asfalto-con-sostenibilidad-ambiental.html>
- Ramírez-Hernández, Aurelio & Valera-Zaragoza, Mario & Aparicio-Saguilán, Alejandro & Conde-Acevedo, Jorge. (2015). *Thermal behavior of banana starch films with degraded polyethylene terephthalate.* Revista mexicana de ingeniería química. 14. 513-521.
- SerProma. 2020. *Campanas de extracción.* Consultado el: 6 de mayo de 2020. Disponible en: <http://gruposerproma.com/equipos/campanas-de-extraccion/>
- Sulyman, M., Haponiuk, J., y Formela K. Utilization of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in Engineering Materials: A Review. (2016) *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol. 7, No. 2.
- Wan, N. Wan, A., Achmad, F., Abdul, W. (2013) *Green Pavement using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt.* *Procedia Engineering*, Volume 53, 2013, Pages 124-128
- White, G. y Reid, G. (2018) *RECYCLED WASTE PLASTIC FOR EXTENDING AND MODIFYING ASPHALT BINDERS* 8th Symposium on Pavement Surface Characteristics: SURF 2018 – Vehicle to Road Connectivity Brisbane, Queensland, 2018.

XI. Anexos

Imagen No. 1 Equipo de sistema de reflujo



Imagen No. 2 PET cortado y colocado en el balón de 500 mL del sistema de reflujo



Imagen No. 3 Sistema de reflujo montado

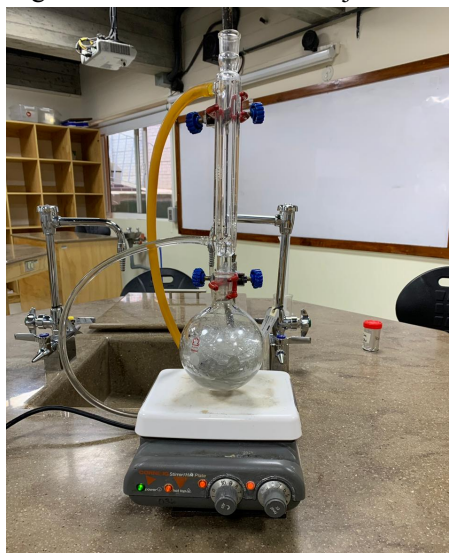


Imagen No. 4 Degradación en sistema de reflujo



Imagen No. 5 Resultado de las tres degradaciones que se llevaron a cabo

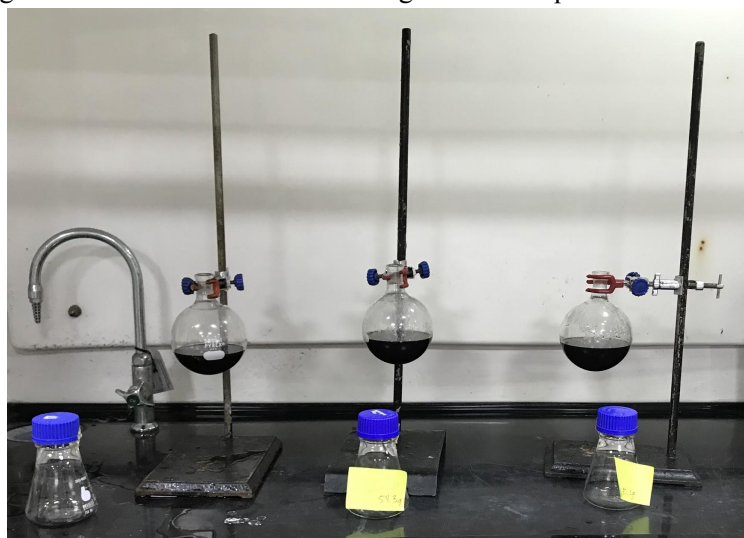


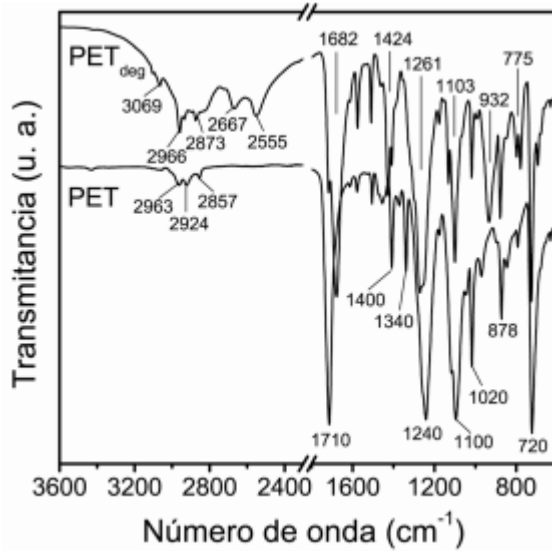
Imagen no. 6 Degradaciones colocadas en erlenmeyer con rosca



Imagen No. 7 Unión de bitumen con DPET en probeta de 100 mL



Imagen No. 8 Comparación de análisis espectros de PET con PET degradado



Fuente Ramírez-Hernández, Aurelio & Valera-Zaragoza, Mario & Aparicio-Saguilán, Alejandro & Conde-Acevedo, Jorge. (2015). *Thermal behavior of banana starch films with degraded polyethylene terephthalate*. Revista mexicana de ingeniería química. 14. 513-521.

Tabla No. 1 Memoria de cálculo para obtener en galones el etilenglicol para la sustitución en área líquida del 10% de bitumen

Gramos de PET	mL de Etilenglicol	Galón de Etilenglicol
100	116	0.03
567.75	658.59	0.14

Tabla No. 2 Memoria de cálculo para obtener en galones el etilenglicol para la sustitución en área líquida del 25% de bitumen

Gramos de PET	mL de Etilenglicol	Galón de Etilenglicol
100	116	0.03
3,548.44	4,116.19	0.91

Tabla No. 3 Memoria de cálculo para obtener en galones el etilenglicol para la sustitución en área líquida del 30% de bitumen

Gramos de PET	mL de Etilenglicol	Galón de Etilenglicol
100	116	0.03
5,109.75	5,927.31	1.30

Tabla No. 4 Memoria de cálculo para obtener en galones el etilenglicol para la sustitución en área líquida del 35% de bitumen

Gramos de PET	mL de Etilenglicol	Galón de Etilenglicol
100	116	0.03
6,954.94	8,067.73	1.77

Tabla No. 5 Memoria de cálculo para obtener en galones el etilenglicol para la sustitución en área líquida del 50% de bitumen

Gramos de PET	mL de Etilenglicol	Galón de Etilenglicol
100	116	0.03
14,193.75	16,464.75	3.62