

PET RECICLADO EN RIGIDEZ DE SUELOS GRANULARES

Influencia de la inclusión de fibras de Tereftalato de Polietileno (PET) recicladas en la rigidez de suelos granulares

David Andrés Martínez Pinto

Edwan Julián Hernández Mora

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela De Ingeniería Civil

Bucaramanga

2018

PET RECICLADO EN RIGIDEZ DE SUELOS GRANULARES

Influencia de la inclusión de fibras de Tereftalato de Polietileno (PET) recicladas en la rigidez de suelos granulares

David Andrés Martínez Pinto

Edwan Julián Hernández Mora

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director

Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

PhD. en Ingeniería Civil

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela De Ingeniería Civil

Bucaramanga

2018

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo general	15
1.2 Objetivos específicos	15
2. Marco teórico	16
2.1 Definición del Tereftalato de Polietileno (PET)	16
2.2 Características mecánicas del Tereftalato de Polietileno (PET)	16
2.3 Suelo granular	18
2.4 Antecedentes	19
2.4.1 PET para refuerzo de morteros.	19
2.4.2 Suelos arcillosos reforzados con tereftalato de polietileno (pet).	20
2.4.3 PET como componente en la conformación de materiales granulares pétreos para pavimentos.	21
3. Metodología y recopilación de la información	22
3.1 Modelo de laboratorio	22
3.2 Caracterización de los materiales	27
3.2.1 Tereftalato de polietileno (PET).	27

3.2.2 Suelo granular.....	30
3.3 Acondicionamiento de probetas para el ensayo.....	34
3.4 Modelos y cantidad de materiales.....	35
3.4.1 Modelo 1.....	35
3.4.2 Modelo 2, 3 y 4.....	35
3.5 Toma de datos.....	37
4. Discusión y análisis de los resultados.....	38
4.1 Comparación de resultados de cada modelo.....	39
4.2 Porcentaje de reducción de la deformación de los modelos.....	40
5. Conclusiones.....	41
Referencias bibliográficas.....	43
Apéndices.....	44

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Mezcla de mortero con fibras de PET.	20
<i>Figura 2.</i> Suelo arcilloso con fibras PET.	21
<i>Figura 3.</i> Escamas de PET procesadas.	22
<i>Figura 4.</i> Planos de los módulos removibles utilizados para el ensayo.	24
<i>Figura 5.</i> Icopor en modulo base.....	25
<i>Figura 6.</i> Capa de arena en el módulo.....	25
<i>Figura 7.</i> Capa de suelo granular en el módulo.....	26
<i>Figura 8.</i> Aglomerado de madera en la parte superior de la estructura.....	26
<i>Figura 9.</i> Montaje en la maquina MTS-810 de la estructura para ensayos.	27
<i>Figura 10.</i> Envases de bebidas recolectados.	28
<i>Figura 11.</i> Envase de bebida limpio.	28
<i>Figura 12.</i> Forma en la que se empieza a transformar el PET en cinta de 0.5 cm de ancho.	29
<i>Figura 13.</i> Resultado del proceso de transformación de envase a cinta.	29
<i>Figura 14.</i> Fibras obtenidas a partir de envases recolectados.	30
<i>Figura 15.</i> Tamizado del suelo granular.....	31
<i>Figura 16.</i> Curva granulométrica del suelo granular.....	32
<i>Figura 17.</i> Comportamiento tipo de la gráfica desplazamiento vs tiempo para los modelos.....	38

<i>Figura 18.</i> Zona estabilizada de la deformación	38
<i>Figura 19.</i> Comparación de deformaciones de los modelos 2,3 y 4 respecto al modelo 1	39
<i>Figura 20.</i> Comparación de deformaciones de los modelos 3 y 4 respecto al modelo 2	40
<i>Figura 21.</i> Comparación de deformaciones del modelo 4 respecto al modelo 3	40

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Características mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas del PET</i>	17
Tabla 2. <i>Resultado del análisis granulométrico del suelo granular</i>	31
Tabla 3. <i>Clasificación de bases granulares según su gradación</i>	33
Tabla 4. <i>Energía de compactación para las capas de materiales</i>	34
Tabla 5. <i>Cantidades de material para Modelo 1</i>	35
Tabla 6. <i>Cantidades de material para Modelo 2</i>	36
Tabla 7. <i>Cantidades de material para Modelo 3</i>	36
Tabla 8. <i>Cantidades de material para Modelo 4</i>	36
Tabla 9. <i>Deformación promedio para cada modelo</i>	39
Tabla 10. <i>Porcentaje de reducción de la deformación entre los modelos</i>	41

Lista de apéndices

	Pag
Apéndice A <i>Gráficas desplazamiento vs tiempo Modelo 1</i>	44
Apéndice B <i>Gráficas desplazamiento vs tiempo Modelo 2</i>	46
Apéndice C <i>Gráficas desplazamiento vs tiempo Modelo 3</i>	48
Apéndice D <i>Gráficas desplazamiento vs tiempo Modelo 4</i>	50

RESUMEN

TITULO: INFLUENCIA DE LA INCLUSION DE FIBRAS DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET) RECICLADAS EN LA RIGIDEZ DE SUELOS GRANULARES. *

AUTOR(ES): DAVID ANDRÉS MARTINEZ PINTO

EDWAN JULIAN HERNANDEZ MORA **

PALABRAS CLAVE: Fibras, Tereftalato de polietileno (PET), suelo granular, rigidez.

DESCRIPCIÓN:

Con el objetivo de generar un menor impacto ambiental sobre el entorno en el cual vivimos y como medida de contingencia ante el alto grado de contaminación que se presenta alrededor del mundo, no solo el generado por la industria de la construcción, que es considerada como una de las más influyentes en este ámbito sino por la gran cantidad de residuos plásticos generados y arrojados cada día en Colombia y alrededor del mundo, se realizó la siguiente investigación, la cual se centró en buscar una alternativa que se pudiese implementar dentro de alguna rama de la ingeniería civil, en este caso vías y transporte, en el cual se analizó la respuesta que presenta un suelo granular tipo base BG-27 en cuestión de deformaciones frente a la aplicación de cargas axiales cíclicas durante doscientos cincuenta ciclos de carga, agregando fibras de tereftalato de polietileno (PET) recicladas de longitud entre 8 y 12 centímetros en diferentes cantidades y de manera totalmente aleatoria sin afectar características del suelo como manejabilidad y compactación, en la que se demostró por medio de un ensayo de laboratorio adaptado a la maquina Material test system MTS-810 por medio de una estructura metálica, que estas fibras de tereftalato de polietileno (PET) recicladas logran tener un efecto leve de reducción de la deformación la capa de suelo granular, lo que conlleva a un aumento de la rigidez de dicha capa.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

ABSTRACT

TITLE: INFLUENCE OF THE INCLUSION OF RECYCLED POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) FIBERS IN THE STIFFNESS OF GRANULAR SOILS*.

AUTHOR(S): DAVID ANDRES MARTINEZ PINTO

EDWAN JULIAN HERNANDEZ MORA **

KEYWORDS: FIBERS, POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET), GRANULAR SOIL, STIFFNESS.

DESCRIPTION:

With the aim of generating a lower environmental impact on the environment in which we live and as a contingency measure in the face of the high level of pollution that occurs around the world, not only the one generated by the construction industry, which is considered as a of the most influential in this area but for the large amount of plastic waste generated and thrown every day in Colombia and around the world, the following research was carried out, which focused on finding an alternative that could be implemented within some branch of civil engineering, in this case roads and transport, in which the response of a granular base soil type BG-27 was analyzed in terms of deformations compared to the application of cyclical axial loads during two hundred and fifty load cycles, adding fibers of recycled polyethylene terephthalate (PET) of length between 8 and 12 centimeters in different quantities and completely randomly without affecting soil characteristics such as handling and compaction, in which it was demonstrated by means of a laboratory test adapted to the MTS-810 material test system by means of a metallic structure, that these recycled polyethylene terephthalate (PET) fibers they achieve a slight effect of reducing the deformation of the granular soil layer, which leads to an increase in the rigidity of said layer.

* Project of grade

** Faculty of Engineering Physical Mechanical. School of Engineering civil Director Eduardo Alberto Castañeda Pinzon

Introducción

Con el objetivo de generar un menor impacto ambiental sobre el entorno en el cual vivimos y buscar una alternativa que se pudiese implementar dentro de alguna rama de la ingeniería civil, se ha desarrollado este proceso investigativo en el cual se analiza la respuesta que presenta un suelo granular en cuestión de deformaciones frente a la aplicación de cargas axiales cíclicas agregando fibras de tereftalato de polietileno (PET) recicladas en diferentes cantidades sin afectar características del suelo como manejabilidad y compactación. De manera experimental se desarrolla un tipo de ensayo acoplando una estructura metálica a la maquina *Material test system MTS-810* para dicho propósito, la cual permite el fácil montaje y desmontaje del tipo de suelo que va a ser sometido al análisis así como los demás materiales y componentes necesarios para realizar el ensayo. Las condiciones de tipo de materiales, características y cantidades se mantienen para todos los ensayos, con el fin de no afectar los resultados obtenidos y en consecuencia el análisis.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Establecer si existe una mejora en la rigidez de un suelo granular al agregarle fibras de tereftalato de polietileno (PET) recicladas.

1.2 Objetivos específicos

- Recolectar, limpiar y caracterizar el PET como fibras de longitudes entre 8 y 12 centímetros de largo y 0.5 centímetros de ancho.
- Determinar las deformaciones presentadas por el suelo granular sometido a una carga axial con y sin agregar fibras PET recicladas.
- Analizar la influencia de las fibras PET recicladas en suelos granulares en base a las deformaciones que presente al aplicar una carga axial.

2. Marco teórico

2.1 Definición del Tereftalato de Polietileno (PET)

El tereftalato de polietileno (PET) es un poliéster aromático perteneciente al grupo de los materiales sintéticos denominados poliésteres (Mariano, 2011). Es un compuesto termoplástico creado a partir de petróleo crudo, gas y aire. Un kilo de tereftalato de polietileno se encuentra conformado por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire. Del petróleo crudo se extrae paraxileno y este al oxidarse con el aire forma ácido tereftálico, por su parte el etileno que se obtiene a partir de derivados del gas natural, es oxidado con aire para formar etilenglicol. El PET es el resultado de la combinación de ácido tereftálico y etilenglicol. (Secretaría del Medio Ambiente - Estado de México, 2018) Actualmente es la principal materia prima para la producción de envases para agua, bebidas gaseosas y aceites

2.2 Características mecánicas del Tereftalato de Polietileno (PET).

Debido a su alto uso en la industria de las bebidas a nivel internacional el PET es un material que posee excepcionales propiedades y características técnicas como lo son muy buena resistencia a tracción, resistencia al impacto o choque, resistencia al roce, ligereza, baja capacidad de absorción de agua, adaptación a cualquier forma y una increíble facilidad de rehuso y/o reciclaje. (La Seda, 2018)

Tabla 1

Características mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas del PET

POLIETILENTEREFTALATO				PET
PROPIEDADES MECANICAS A 23°C	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
PESO ESPECIFICO	gr/cm3	D-792	53479	1.39
RESIST. A LA TRACC.(FLUENCIA / ROTURA)	Kg/cm ²	D-638	53455	900 / --
RES. A LA COMPRESION (1 Y 2 % DEF)	Kg/cm ²	D-695	53454	260 / 480
RESISTENCIA A LA FLEXION	Kg/cm ²	D-790	53452	1450
RES. AL CHOQUE SIN ENTALLA	Kg.cm/cm ²	D-256	53453	> 50
ALARGAMIENTO A LA ROTURA	%	D-638	53455	15
MODULO DE ELASTICIDAD (TRACCION)	Kg/cm ²	D-638	53457	37000
DUREZA	Shore D	D-2240	53505	85 - 87
COEF. DE ROCE ESTATICO S/ACERO		D-1894		--
COEF. DE ROCE DINAMICO S/ACERO		D-1894		0.20
RES. AL DESGASTE POR ROCE				MUY BUENA
PROPIEDADES TERMICAS	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
CALOR ESPECIFICO	Kcal/Kg.°C	C-351		0.25
TEMP. DE FLEXION B/CARGA (18.5Kg/cm ²)	°C	D-648	53461	75
TEMP. DE USO CONTINUO EN AIRE	°C			-20 a 110
TEMP. DE FUSION	°C			255
COEF. DE DILATACION LINEAL DE 23 A 100°C	por °C	D-696	52752	0.00008
COEF. DE CONDUCCION TERMICA	Kcal/m.h.°C	C-177	52612	0.25
PROPIEDADES ELECTRICAS	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
CONSTANTE DIELECTRICA A 60 HZ		D-150	53483	3,4
CONSTANTE DIELECTRICA A 1 KHZ		D-150	53483	3,3
CONSTANTE DIELECTRICA A 1 MHZ		D-150	53483	3,2
ABSORCION DE HUMEDAD AL AIRE	%	D-570	53472	0,25
RESISTENCIA SUPERFICIAL	Ohm	D-257	53482	> 10 a la 14
RESISTENCIA VOLUMETRICA	Ohms-cm	D-257	53482	> 10 a la 15
RIGIDEZ DIELECTRICA	Kv/mm	D-149		22
PROPIEDADES QUIMICAS	OBSERVACIONES			
RESISTENCIA A HIDROCARBUROS	BUENA			
RESISTENCIA A ACIDOS DEBILES A TEMP. AMBIENTE	BUENA			
RESISTENCIA A ALCALIS DEBILES A TEMP. AMBIENTE	BUENA			
RESISTENCIA A PROD. QUIMICOS DEFINIDOS	CONSULTAR			
EFECTO DE LOS RAYOS SOLARES	ALGO LO AFECTAN			
APROBADO PARA CONTACTO CON ALIMENTOS	SI			
COMPORTAMIENTO A LA COMBUSTION	ARDE CON MEDIANA DIFICULTAD			
PROPAGACION DE LLAMA	MANTIENE LA LLAMA			
COMPORTAMIENTO AL QUEMARLO	GOTEA			
COLOR DE LA LLAMA	AMARILLO ANARANJADO TIZNADO			
OLOR AL QUEMARLO	AROMATICO DULCE			

Fuente: Datos técnicos industrias JQ, Disponible en: <http://www.jq.com.ar/imagenes/productos/pet/dtecnicos/dtecnicos.htm>

2.3 Suelo granular

El suelo puede ser cohesivo o granular. El suelo cohesivo contiene pequeñas partículas y suficiente arcilla para que el suelo se adhiera a sí mismo. Cuando el suelo es más cohesivo, es porque tiene mayor cantidad de arcilla, y presenta menos probabilidades de que se produzca un derrumbe. Los suelos granulares están formados por partículas gruesas como la arena o la grava. Este tipo de suelo no se adhiere a sí mismo. Cuando el suelo es menos cohesivo, se necesita llevar adelante mayores medidas para prevenir un derrumbe.

Los suelos pueden clasificarse como Tipo A, Tipo B o Tipo C. El suelo Tipo A es el suelo más estable para excavar. El suelo Tipo C es el menos estable.

El suelo Tipo A es cohesivo, y tiene una alta fuerza de compresión (1.5 toneladas por pie cuadrado o más). Dentro de los suelos Tipo A encontramos la arcilla, la arcilla limosa, la arcilla arenosa y el suelo franco arcilloso. Un suelo no puede clasificarse como Tipo A si presenta fisuras, si ha sido intervenido anteriormente, si presenta filtraciones de agua, o si está sujeto a vibraciones causadas por tránsito pesado o martinets.

El suelo Tipo B es cohesivo y a menudo presenta fisuras o ha sido intervenido, con fragmentos que no se adhieren tan bien como en el suelo Tipo A. El suelo Tipo B presenta una fuerza de compresión media (entre 0.5 y 1.5 toneladas por pie cuadrado). Entre los ejemplos de suelo Tipo B encontramos la grava angular, el limo, el suelo franco limoso y los suelos que

presentan fisuras o se encuentran cerca de fuentes de vibración, pero que de lo contrario serían Tipo A.

El suelo Tipo C es el tipo de suelo menos estable. El tipo C incluye suelos granulares en los que las partículas no se adhieren y los suelos cohesivos con una baja fuerza de compresión (0.5 toneladas por pie cuadrado o menos). Entre los ejemplos de suelos Tipo C encontramos la grava y la arena. Debido a que no es estable, el suelo que presenta filtraciones de agua es automáticamente clasificado como suelo Tipo C, independientemente de sus otras características. (United States Department of Labor , 2018)

2.4 Antecedentes

2.4.1 PET para refuerzo de morteros. El cuerpo académico de materiales de la Facultad de ingeniería de la UAQ trabajó en una mezcla elaborada con un cementante hidráulico, arena y agua utilizando fibras de tereftalato de polietileno recicladas. Destacó que en este tipo de morteros reforzados proporcionaron una mayor resistencia mecánica y de rigidez y ahorro en el costo de elaboración del material.

El proceso de elaboración de las fibras consistía en realizar cortes mecánicos a los envases con unas navajas hasta obtener hilos para luego ser sustituidos por una fracción parcial de los agregados, en dicho caso la arena.

Después de la realización de diferentes pruebas y ensayos lograron determinar que al agregar este material reciclado a la mezcla de mortero la resistencia a flexión obtenía un aumento de 20 a 30 % de la utilización común. (Valencia, sf)



Figura 1. Mezcla de mortero con fibras de PET. Adaptado de Fibras de PET para la construcción, Disponible en:

<http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/materiales/16185-fibras-pet-construccion>

2.4.2 Suelos arcillosos reforzados con tereftalato de polietileno (pet). Por medio de la inclusión de fibras de tereftalato de polietileno de entre 5 y 8 centímetros de longitud a suelos arcillosos y la realización de ensayos de CBR al suelo se ha logrado demostrar que se obtienen mejoras en la resistencia a compresión así como de la cohesión de este entre un 6 a 36 % de la que se tiene sin el agregado.

Se demostró que a medida que la cantidad del porcentaje de fibra aumenta, los esfuerzos a cortante y la ductilidad crecen. (López, pág. 67)



Figura 2. Suelo arcilloso con fibras PET. Adaptado de Suelos arcillosos reforzados con materiales de plástico reciclado PET, Disponible en: <https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/265/1/CIVI0402.pdf>

2.4.3 PET como componente en la conformación de materiales granulares pétreos para pavimentos. A través de la inclusión de escamas de plástico reciclado, se midió el porcentaje de CBR en muestras de base y sub-base granular, variando el porcentaje de plástico reciclado que se incluía en las muestras, obteniendo que al agregar alrededor de un 1% y 2% del peso de la muestra en este material, se obtenía un incremento de alrededor de 46% el porcentaje de CBR en bases granulares, y en sub-bases granulares de un 94%. (Cortes, Arciniegas, & Salinas, 2016, pág. 60)



Figura 3. Escamas de PET procesadas. Adaptada de Cortes, Eduardo; Arciniegas, Luis; Salinas, Yamid. (2016). Influencia de la inclusión del reciclaje de botellas plásticas como uno de los componentes en la conformación de materiales granulares pétreos para pavimentos. En: Revista Ingenieros Militares. Vol 11. p. 60.

3. Metodología y recopilación de la información

3.1 Modelo de laboratorio

Para poder determinar la influencia de las fibras de PET reciclado en un suelo granular, se concibió un modelo de laboratorio que consiste en:

- Capa base de 10 centímetros de espesor que simula un suelo blando y que permita medir adecuadamente la deformación hecha de polietileno expandido (icopor).
- Capa de arena de 5 centímetros de espesor que uniformiza la deformación del suelo granular sobre el icopor.
- Capa de suelo granular a analizar de 10 centímetros de espesor.
- Capa de arena de 5 centímetros de espesor que uniformiza la carga aplicada por la máquina y la distribuye en el suelo.
- Aglomerado de madera de 1.5 centímetros de espesor que distribuye la carga aplicada por la maquina en toda el área superficial de la probeta que será objeto de estudio.

Debido a que no existe una norma o metodología pre existente para realizar el tipo de ensayo fue necesario realizar una adaptación de la maquina *Material test system MTS-810* la cual permitiera el montaje y desmontaje del suelo granular que sería objeto de estudio y análisis, así como de los demás materiales necesarios para el adecuado desarrollo del ensayo.

Como resultado se obtuvo la creación de 4 módulos removibles compuestos por ángulos tipo L de 1x1x0.0787 pulgadas de acero soldados entre sí y con 16 orificios que permitan la unión entre ellos. Además se agregaron 4 láminas de poliestileno para asegurar el adecuado confinamiento del material y evitar posibles fugas del mismo.

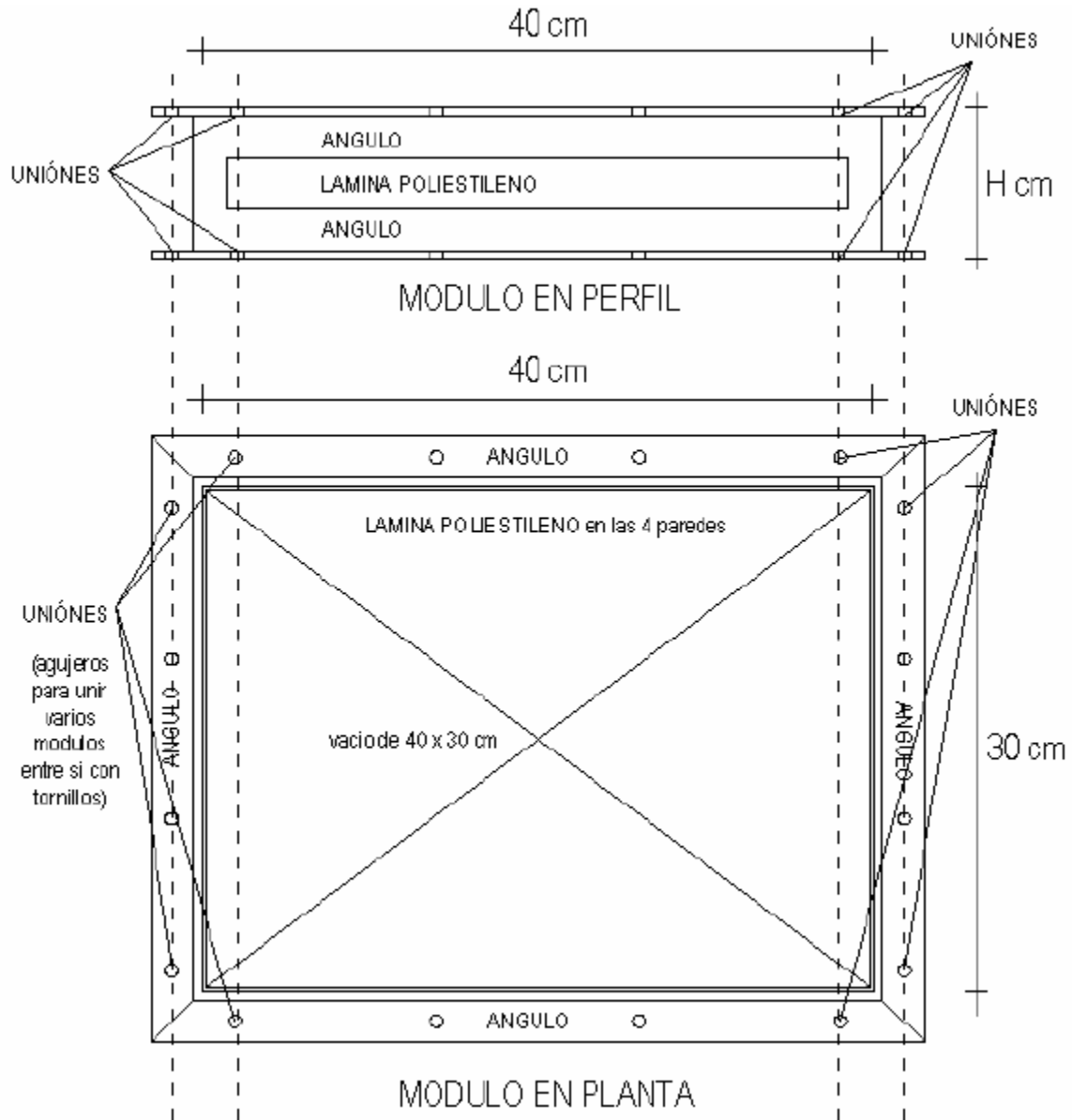


Figura 4. Planos de los módulos removibles utilizados para el ensayo.

El modulo base, fue reforzado con una placa de acero de 0.5 centímetros de espesor, una anillo de 6 pulgadas de diámetro que permitía el adecuado encaje con la maquina MTS-810 así como 4 refuerzos para evitar errores en la lectura de las deformaciones ocasionadas por la deflexión de la placa base al aplicar la carga axial.

La adaptación de cada una de las capas a los módulos se realizó como se muestra en las figuras 5, 6, 7, 8, 9.

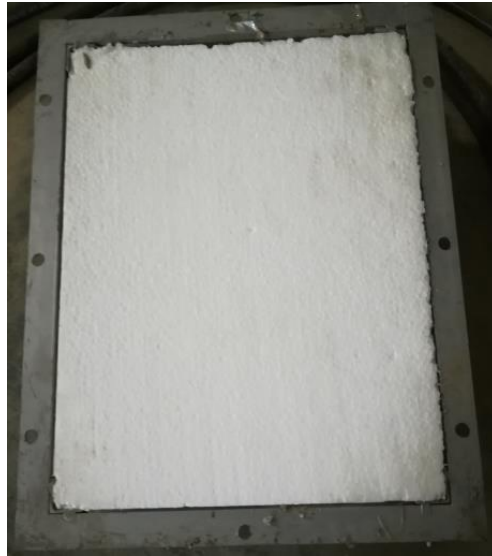


Figura 5. Icopor en modulo base



Figura 6. Capa de arena en el módulo



Figura 7. Capa de suelo granular en el módulo



Figura 8. Aglomerado de madera en la parte superior de la estructura.



Figura 9. Montaje en la maquina MTS-810 de la estructura para ensayos.

3.2 Caracterización de los materiales

3.2.1 Tereftalato de polietileno (PET). Para el proceso de obtención de las fibras de tereftalato de polietileno recicladas fue necesario seguir el siguiente procedimiento:

- Recolectar envases de bebidas gaseosas y jugos en presentaciones de 1.25 Litros, 2.5 Litros y 3 Litros



Figura 10. Envases de bebidas recolectados.

- Limpiar de residuos y etiquetas cada una de las botellas



Figura 11. Envase de bebida limpio.

- Se retira la parte inferior y más dura de la botella y con ayuda de un pedazo de madera y una cuchilla se procede a convertir el envase en una larga cinta de 0.5 centímetros de ancho. Como se observa en las figuras 12 y 13.



Figura 12. Forma en la que se empieza a transformar el PET en cinta de 0.5 cm de ancho.



Figura 13. Resultado del proceso de transformación de envase a cinta.

- Por último la cinta se recorta en trozos de entre 8 y 12 centímetros de largo, tamaño determinado para realizar el estudio.



Figura 14. Fibras obtenidas a partir de envases recolectados.

3.2.2 Suelo granular. El material obtenido fue obtenido en un depósito de materiales, el cual se decía que era una base granular, para lo cual teniendo en cuenta el procedimiento para análisis granulométrico de agregados finos y gruesos de I.N.V.E 213-0.7 y el Artículo 330-13 del instituto nacional de vías en la Tabla 330-3 se determinó la granulometría de la siguiente manera:

- Selección de 5000 g de material y luego tamizar con la configuración dada en la norma de I.N.V.E 213-0.7 como se muestra en la figura 15.



Figura 15. Tamizado del suelo granular.

- Se procede a pesar en una báscula de 0.001 gramos la cantidad de suelo retenido por cada uno de los tamices como se muestra en la Tabla 2 y se grafica la curva granulométrica en la Figura 16.

Tabla 2

Resultado del análisis granulométrico del suelo granular.

Tamiz N°	Tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa
3"	76.2	0	0.00%	0.00%	100.00%
2"	50.8	0	0.00%	0.00%	100.00%
1 1/2"	38.1	0	0.00%	0.00%	100.00%

Tabla 3. *Continuación*

Tamiz N°	Tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa
1"	25.4	0	0.00%	0.00%	100.00%
3/4"	19	75	1.50%	1.50%	98.50%
3/8"	9.5	2054	41.10%	42.61%	57.39%
4	4.75	685	13.71%	56.31%	43.69%
10	2	428	8.57%	64.88%	35.12%
20	0.84	342	6.84%	71.72%	28.28%
40	0.42	286	5.72%	77.45%	22.55%
60	0.25	169	3.38%	80.83%	19.17%
100	0.149	346	6.92%	87.75%	12.25%
200	0.074	319	6.38%	94.14%	5.86%
Fondo		293	5.86%	100.00%	0.00%
	Suma	4997			

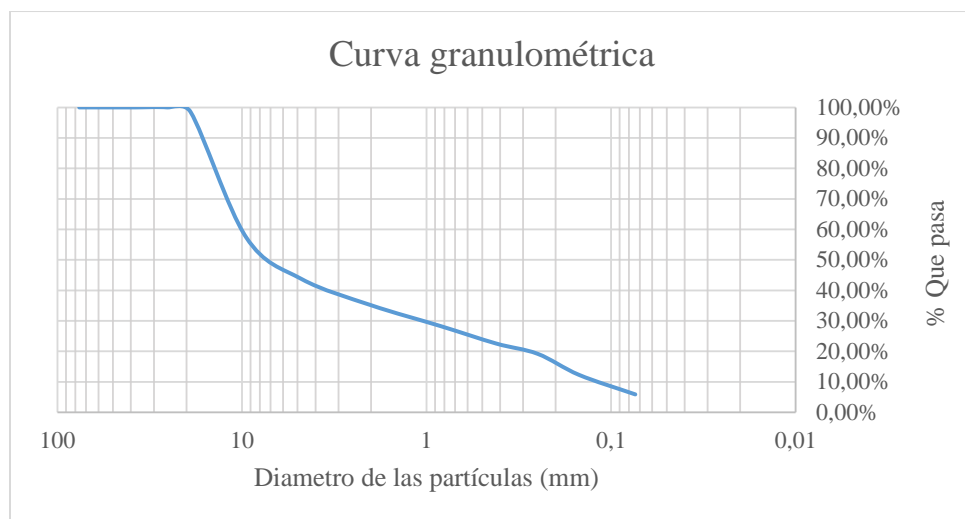


Figura 16. Curva granulométrica del suelo granular.

- Se selecciona el tipo de sub-base granular de acuerdo al Artículo 330-13 del instituto nacional de vías, para lo cual da una base BG-27.

Tabla 4

Clasificación de bases granulares según su gradación.

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm / U.S. Standard)							
	37.5	25.0	19.0	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
	1 ½"	1"	¾"	⅜"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
% PASA								
BASES GRANULARES DE GRADACIÓN GRUESA								
BG-40	100	75-100	65-90	45-68	30-50	15-32	7-20	0-9
BG-27	-	100	75-100	52-78	35-59	20-40	8-22	0-9
BASES GRANULARES DE GRADACIÓN FINA								
BG-38	100	70-100	60-90	45-75	30-60	20-45	10-30	5-15
BG-25	-	100	70-100	50-80	35-65	20-45	10-30	5-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %			6 %			3 %

Fuente: Instituto Nacional De Vías. Artículo 330-13

3.3 Acondicionamiento de probetas para el ensayo

A partir del modelo de ensayo presentado se procede a rellenar cada uno de los módulos de acero hasta completar el espesor de capa deseado. A partir de una relación con la compactación realizada en el ensayo de próctor modificado se calculó la energía de compactación que se manejaría para cada capa, esta energía se expresó en número de golpes del compactador de la prueba de próctor modificado calculados a partir de una regla de tres simple y expresados en la Tabla 4.

Tabla 5

Energía de compactación para las capas de materiales.

Prueba Próctor	
Volumen Probeta	2085 cm ³
golpes por capa	56 und
Numero de capas	5 und
golpes totales	280 und
Arena Gruesa	
Volumen de capa	6000 cm ³
número de golpes	806 und
Densidad	1.49 g/cm ³
Suelo Analizado	
Volumen de capa	12000 cm ³
número de golpes	1612 und
Densidad	1.9725 g/cm ³

3.4 Modelos y cantidad de materiales

Para el estudio se realizaron 2 probetas para 4 Mezclas de suelo y PET según los modelos 1, 2, 3 y 4.

3.4.1 Modelo 1. El modelo 1 consta de las cantidades de material mostrados en la Tabla 5.

Tabla 6

Cantidades de material para Modelo 1.

Modelo 1	Masa [g]	Volumen [cm3]	Densidad [g/cm3]
Polietileno expandido	125	12000	0.010416667
Arena	8940	6000	1.490
Suelo granular	23670	12000	1.973
PET	0	0	1.390

3.4.2 Modelo 2, 3 y 4. Para los modelos 2,3 y 4 se varió la cantidad de fibras de PET en cantidades de 250, 350 y 500 gramos respectivamente. Para asegurar que la densidad de la mezcla suelo-PET continuara siendo equivalente a la del modelo 1, a partir de la masa y la densidad del PET se calcula el volumen que ocupa, el cual es restado al del modelo 1 que da como resultado la cantidad de suelo necesario para realizar la prueba y así obtener la cantidad de material necesario. Los valores de las cantidades se muestran en las Tablas 6,7 y 8.

Tabla 7

Cantidades de material para Modelo 2.

Modelo 2	Masa [g]	Volumen [cm3]	Densidad [g/cm3]
Polietileno expandido	125	12000	0.010416667
Arena	8940	6000	1.490
Suelo granular	23315	11820.144	1.973
PET	250	179.856	1.390

Tabla 8

Cantidades de material para Modelo 3.

Modelo 3	Masa [g]	Volumen [cm3]	Densidad [g/cm3]
Polietileno expandido	125	12000	0.010416667
Arena	8940	6000	1.490
Suelo granular	23173	11748.201	1.973
PET	350	251.799	1.390

Tabla 9

Cantidades de material para Modelo 4.

Modelo 4	Masa [g]	Volumen [cm3]	Densidad [g/cm3]
Polietileno expandido	125	12000	0.010416667
Arena	8940	6000	1.490
Suelo granular	22960	11640.288	1.973
PET	500	359.712	1.390

3.5 Toma de datos

La toma de datos se realizó sobre las deformaciones presentadas por cada uno de los modelos frente a la aplicación de una carga axial-cíclica de 6.2 kN con una frecuencia de 1 ciclo por segundo durante 250 ciclos de carga.

Todos los modelos presentaron dos intervalos de comportamiento, un primer intervalo de compactación (de 0 a 190 segundos) y luego un segundo intervalo de estabilización del desplazamiento del modelo (de 190 segundos en adelante). Figura 17.

El desplazamiento ocurrido después de transcurridos 190 segundos, donde la deformación es más estable fue el que se tomó para realizar las diferentes comparaciones. Figura 18.

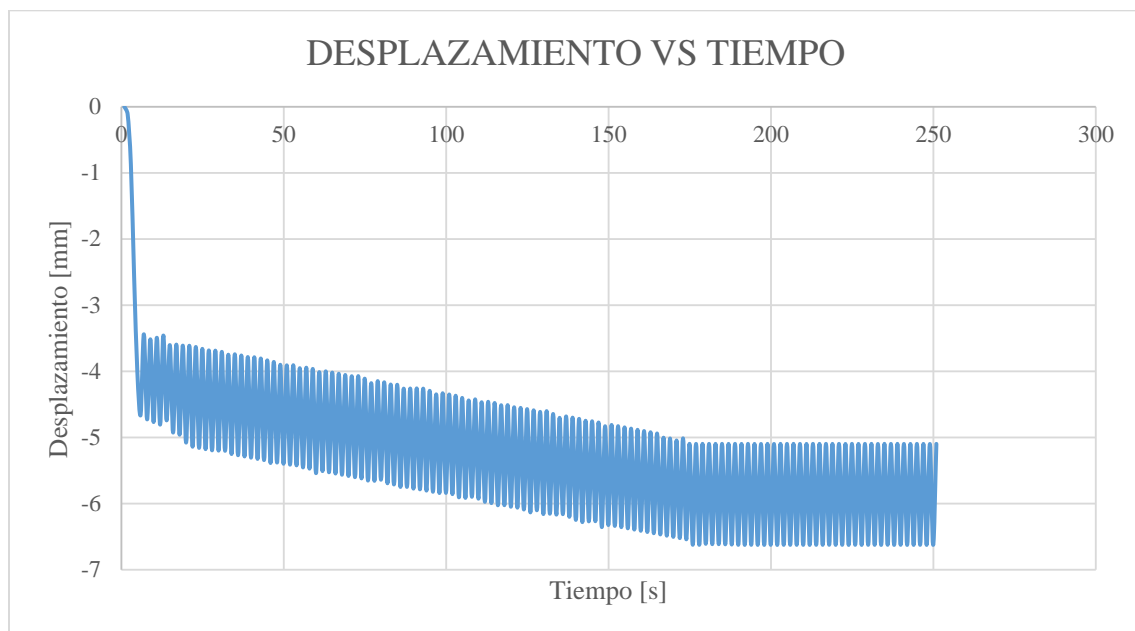


Figura 17. Comportamiento tipo de la gráfica desplazamiento vs tiempo para los modelos.

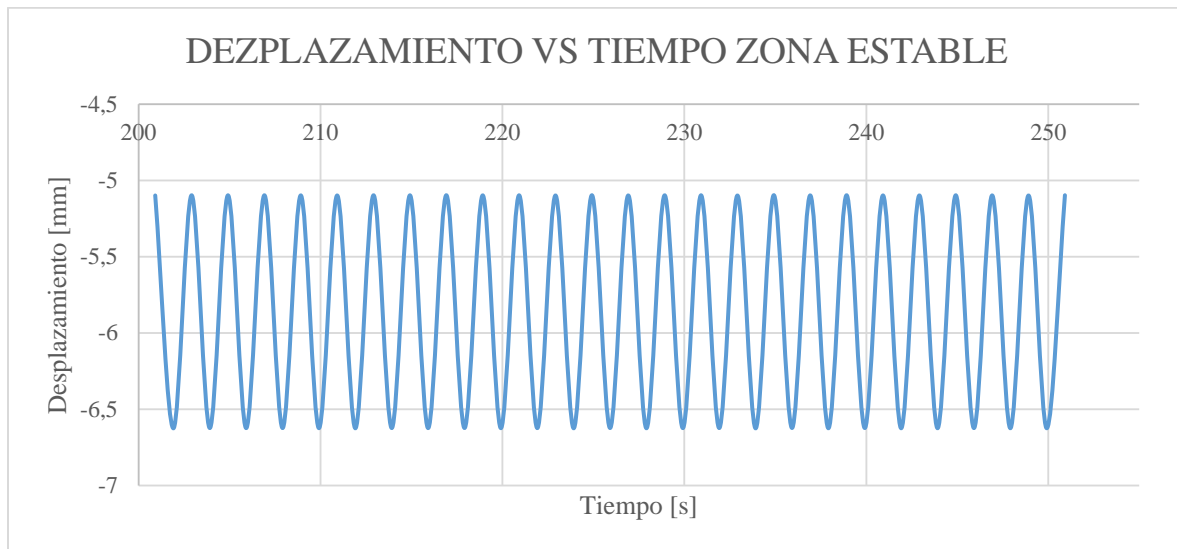


Figura 18. Zona estabilizada de la deformación

Las gráficas de desplazamiento vs tiempo para los modelos 1, 2, 3 y 4 se encuentran en los Apéndice A, B, C y D respectivamente. Páginas 37 a 44.

4. Discusión y análisis de los resultados

Para cada modelo se obtuvo el valor promedio de los valores de deformación presentados en las zonas de deformación estables, los cuales se pueden observar en la Tabla 9.

Tabla 10

Deformación promedio para cada modelo

	Deformación (mm)
Modelo 1	1.526340863
Modelo 2	1.514580598
Modelo 3	1.495212451
Modelo 4	1.473937971

4.1 Comparación de resultados de cada modelo

Para cada deformación presentada por los modelos se comparó la deformación respecto al modelo 1 (suelo sin agregado de fibras PET), así como entre los modelos 2, 3 y 4 (suelos con agregado de fibras PET) para conocer cómo se comporta la deformación en función de la cantidad de fibras PET agregadas al suelo estudiado.

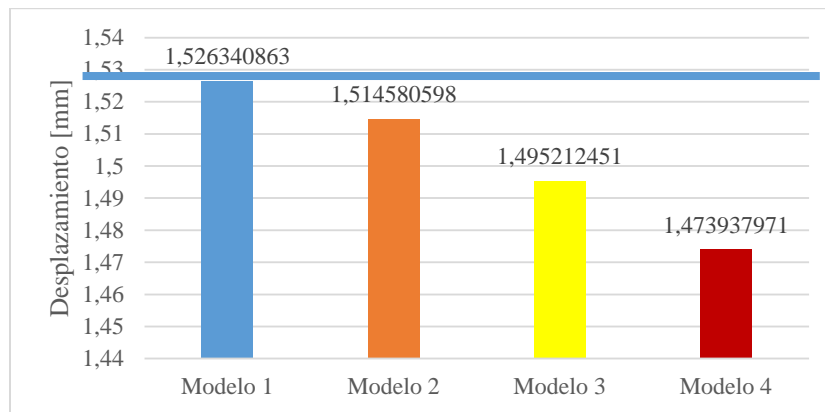


Figura 19. Comparación de deformaciones de los modelos 2,3 y 4 respecto al modelo 1

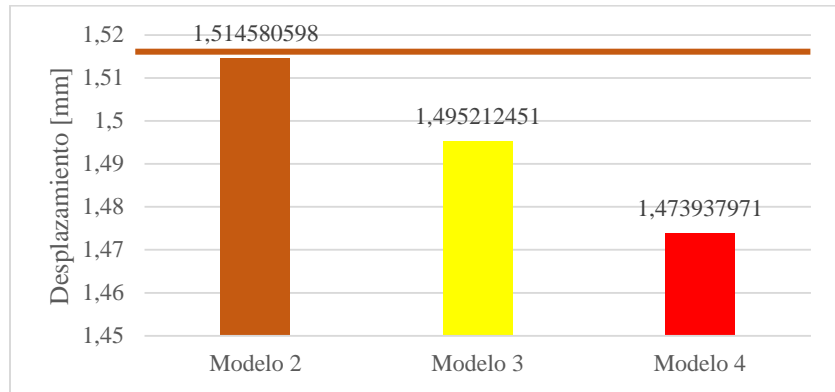


Figura 20. Comparación de deformaciones de los modelos 3 y 4 respecto al modelo 2

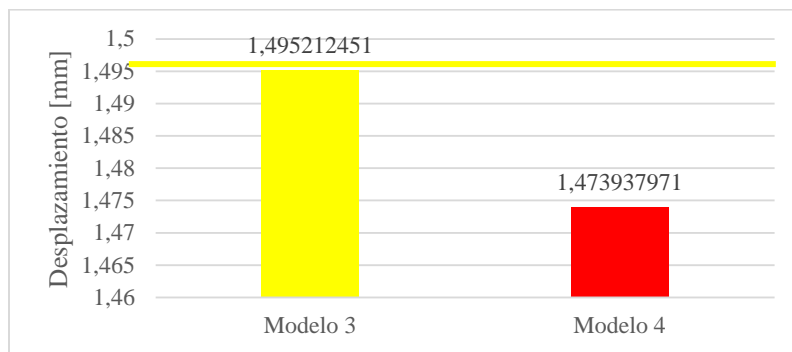


Figura 21. Comparación de deformaciones del modelo 4 respecto al modelo 3

4.2 Porcentaje de reducción de la deformación de los modelos

Para cada deformación presentada por los modelos se calculó el porcentaje de reducción de la deformación respecto al modelo 1 (suelo sin agregado de fibras PET), así como entre los modelos 2, 3 y 4 (suelos con agregado de fibras PET) para conocer como aumenta el porcentaje de reducción de deformación en función de la cantidad de fibras PET agregadas al suelo estudiado. Tabla 10.

Tabla 11

Porcentaje de reducción de la deformación entre los modelos

Modelo	% Reducción
Respecto al Modelo 1	
2	0.770%
3	2.039%
4	3.433%
Respecto al Modelo 2	
3	1.279%
4	2.683%
Respecto al Modelo 3	
4	1.423%

5. Conclusiones

La cantidad de material que se puede obtener a partir de un envases de PET reciclado es de alrededor de 15 metros de cinta de 0.5 cm de ancho.

El modelo de laboratorio empleado para la investigación permite determinar la deformación que se produce en la capa de suelo granular con y sin agregado de fibras PET recicladas.

Las dosificaciones de 250g, 350g y 500g corresponden al 1.5%, 2.11% y 3.02% del volumen total de la muestra de suelo analizado.

La cantidad máxima de fibras que es posible agregar al suelo es del 3% del volumen. Valores por encima del 3% producen problemas de manipulación, moldeo y compactación de las probetas.

El porcentaje de reducción de la deformación en la capa de suelo granular al agregar fibras PET recicladas es muy bajo, alcanzando como reducción máxima un 3.433%.

La deformación que presenta la capa de suelo granular disminuye a medida que aumenta la cantidad de fibras PET recicladas que se agregan al material.

La implementación de este método en proyectos de ingeniería no se considera viable u óptima ya que el porcentaje de mejora en la rigidez del suelo es muy poco comparado con el trabajo que representa dicha implementación.

Referencias bibliográficas

Cortes, E., Arciniegas, L., & Salinas, Y. (2016). Influencia de la inclusión del reciclaje de botellas plásticas como uno de los componentes en la conformación de materiales granulares pétreos para pavimentos. Vol 11. *Revista Ingenieros Militares*, 60.

La Seda. (24 de Abril de 2018). *PET (Polietileno Tereftalato)*. Obtenido de http://laseda.es/index2.php?lang=es&ID_cat=&PID_cat=&SID_cat=338&SSID_cat=343

López, J. (s.f.). *Suelos arcillosos reforzados con materiales de plástico reciclado (PET)*.

Obtenido de Escuela de Ingeniería de Antioquia. Envigado, Colombia:

<https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/265/1/CIVIO402.pdf>

Mariano, M. (30 de Mayo de 2011). *Tecnología de los plásticos [revisado 01 Octubre 2017]*. .

Obtenido de <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.co/2011/05/pet.html>

Secretaría del Medio Ambiente - Estado de México. (19 de Abril de 2018). *¿Qué es el*

Polietileno-Tereftalato? Obtenido de

http://sma.edomex.gob.mx/que_es_polietilenotereftalato

United States Department of Labor . (24 de Abril de 2018). *Clasificación del suelo | La*

transcripción. Obtenido de

https://www.osha.gov/dts/vtools/construction/soil_testing_fnl_spa_web_transcript.html

Valencia, I. (sf). *Fibras de PET para la construcción Universidad Autónoma de Querétaro*.

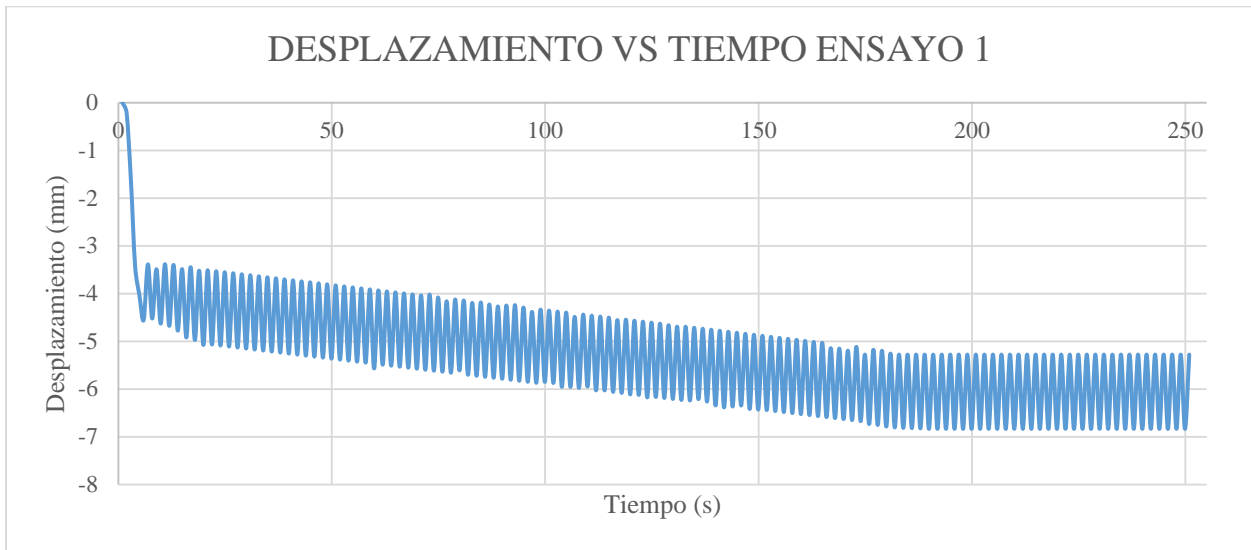
Obtenido de <http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/materiales/16185->

[fibras-pet-construccion](http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/materiales/16185-fibras-pet-construccion)

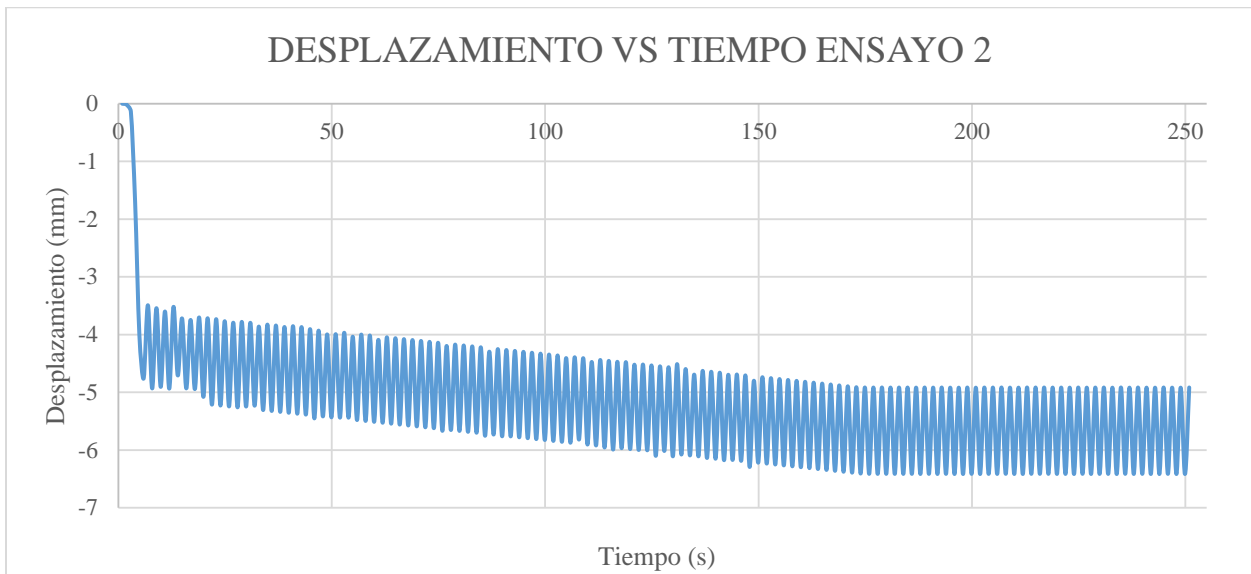
Apéndices

Apéndice A Gráficas desplazamiento vs tiempo Modelo 1

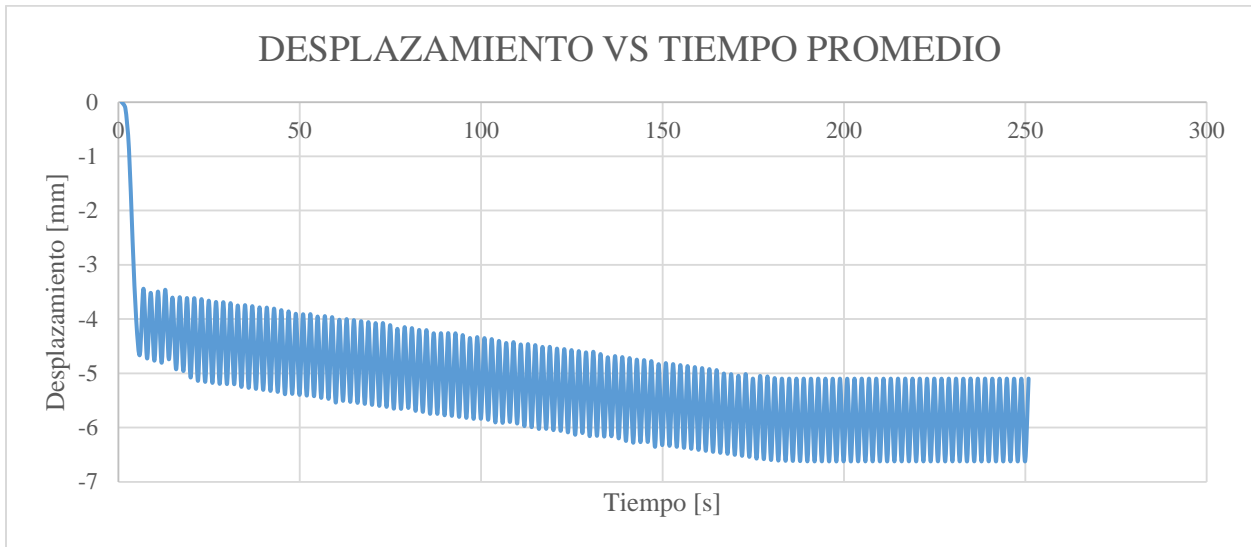
Ensayo 1



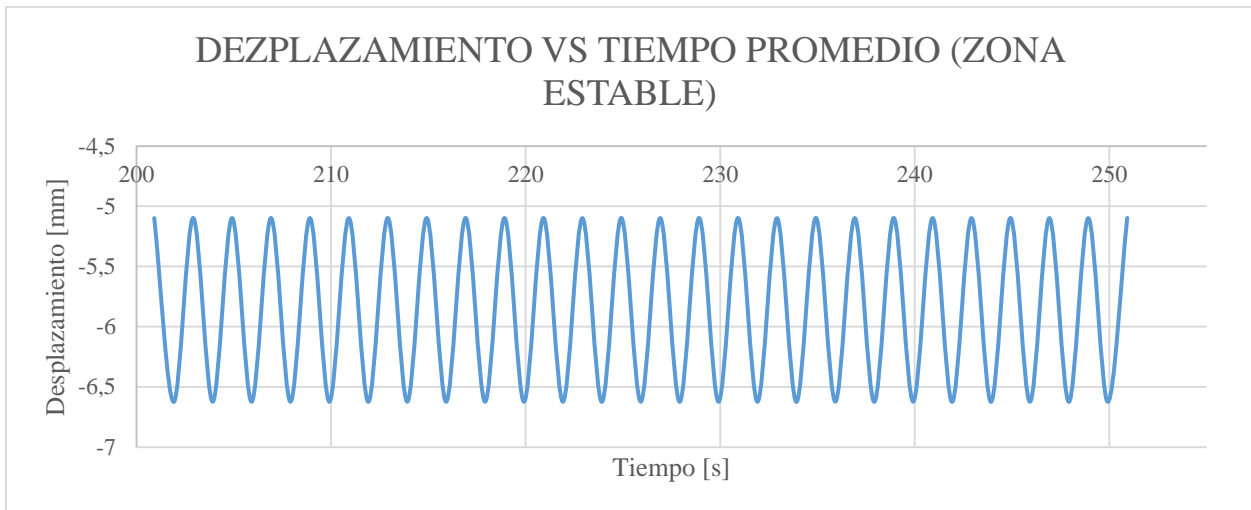
Ensayo 2



Promedio

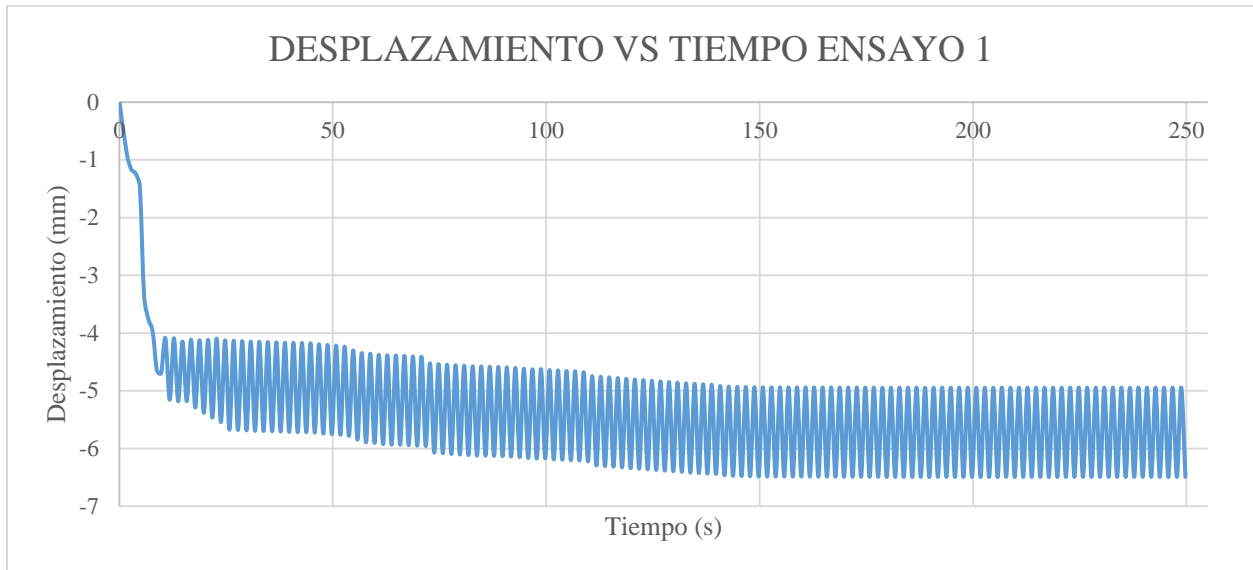


Zona estable promedio

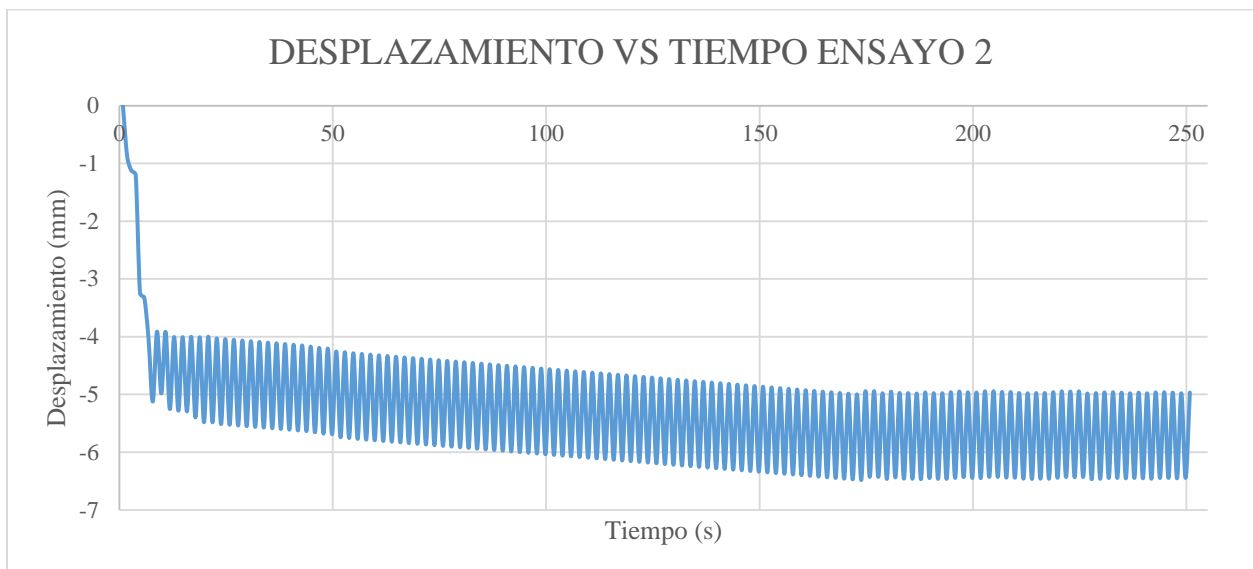


Apéndice B *Gráficas desplazamiento vs tiempo Modelo 2*

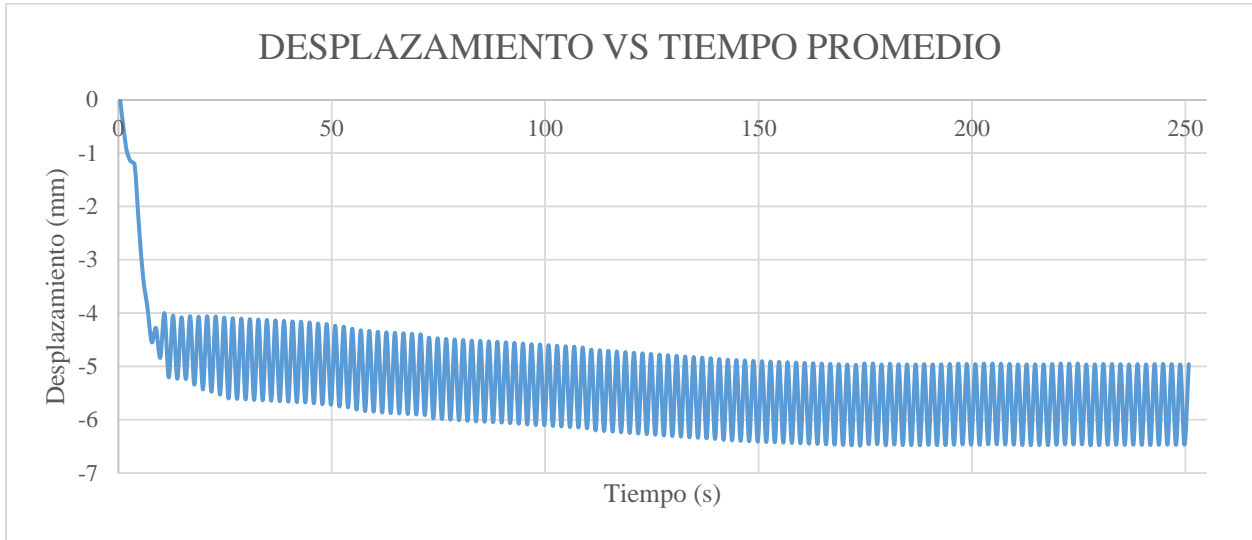
Ensayo 1



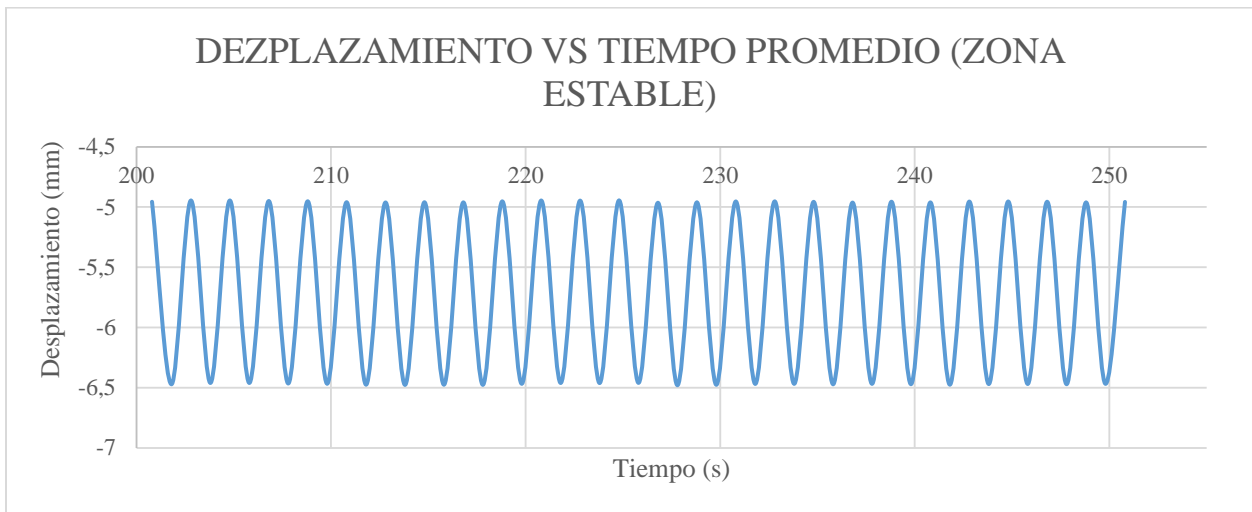
Ensayo 2



Promedio

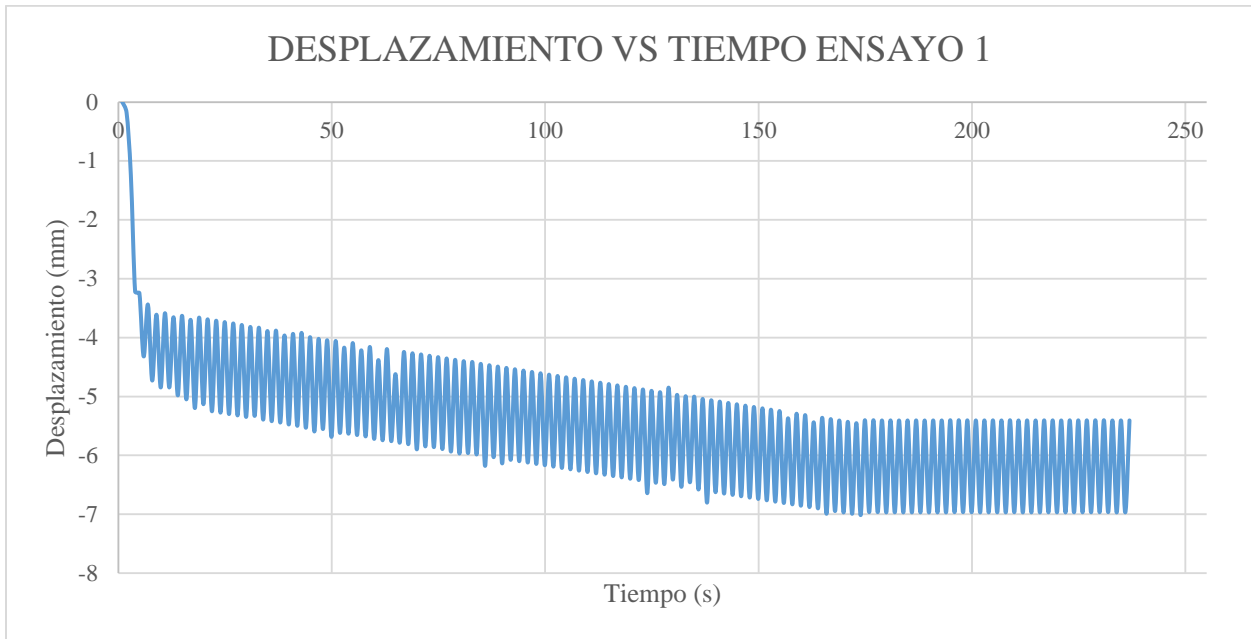


Zona estable promedio

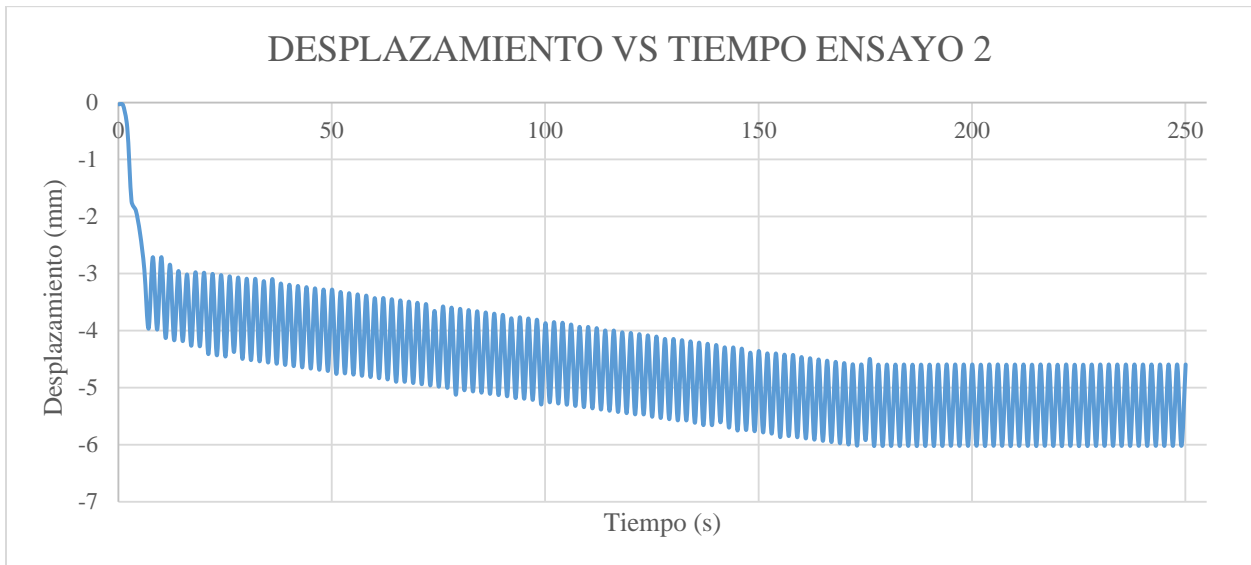


Apéndice C *Gráficas desplazamiento vs tiempo Modelo 3*

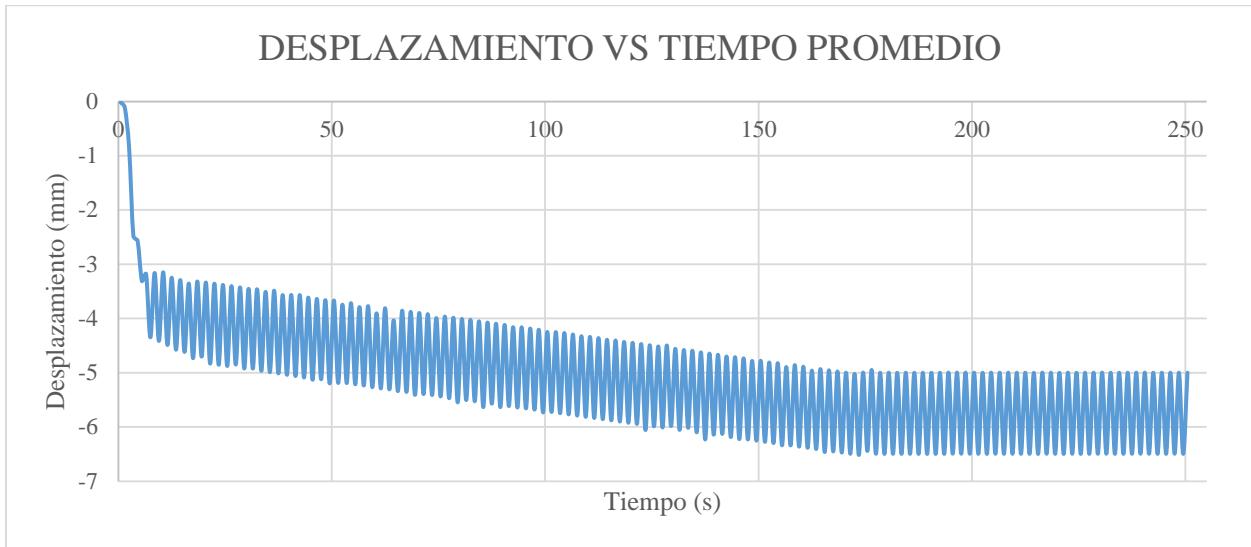
Ensayo 1



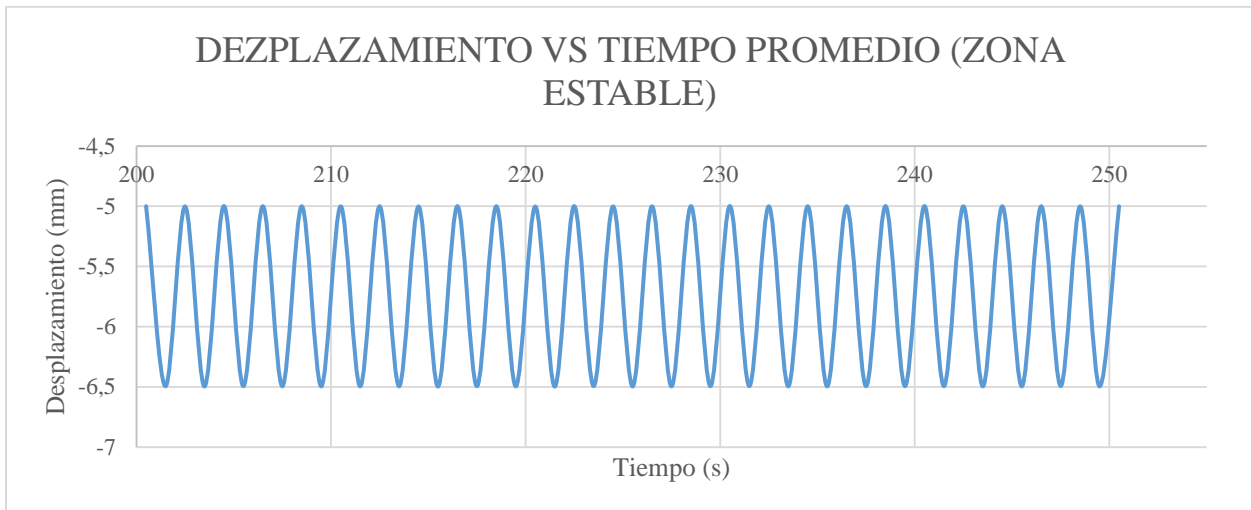
Ensayo 2



Promedio

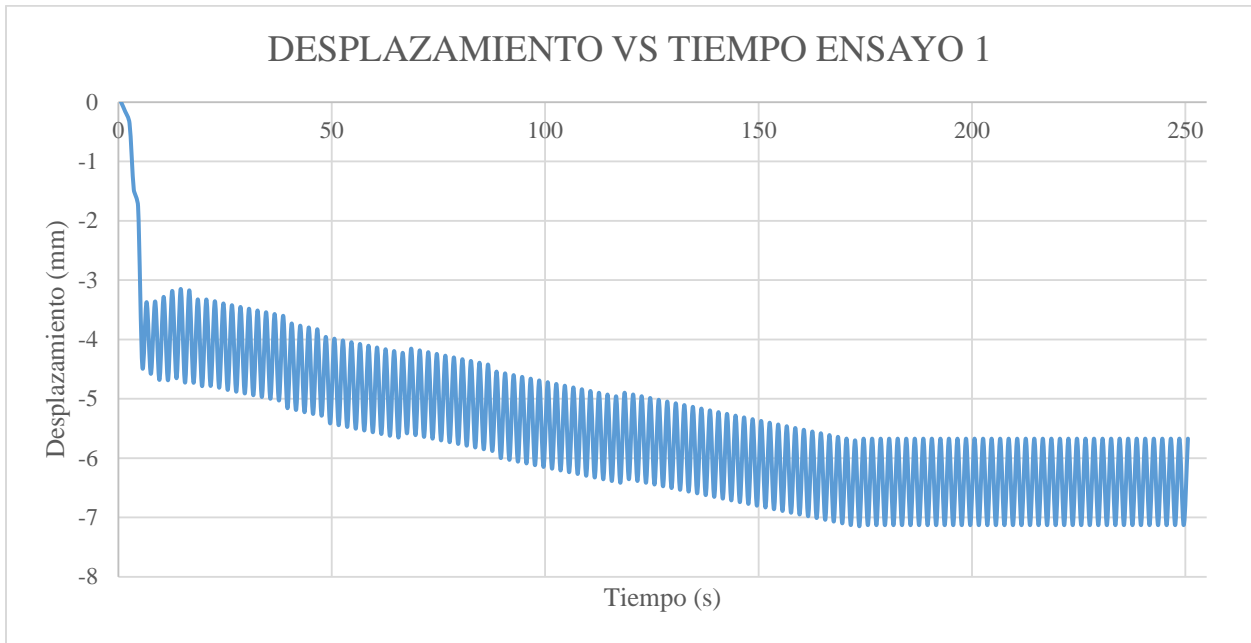


Zona estable promedio

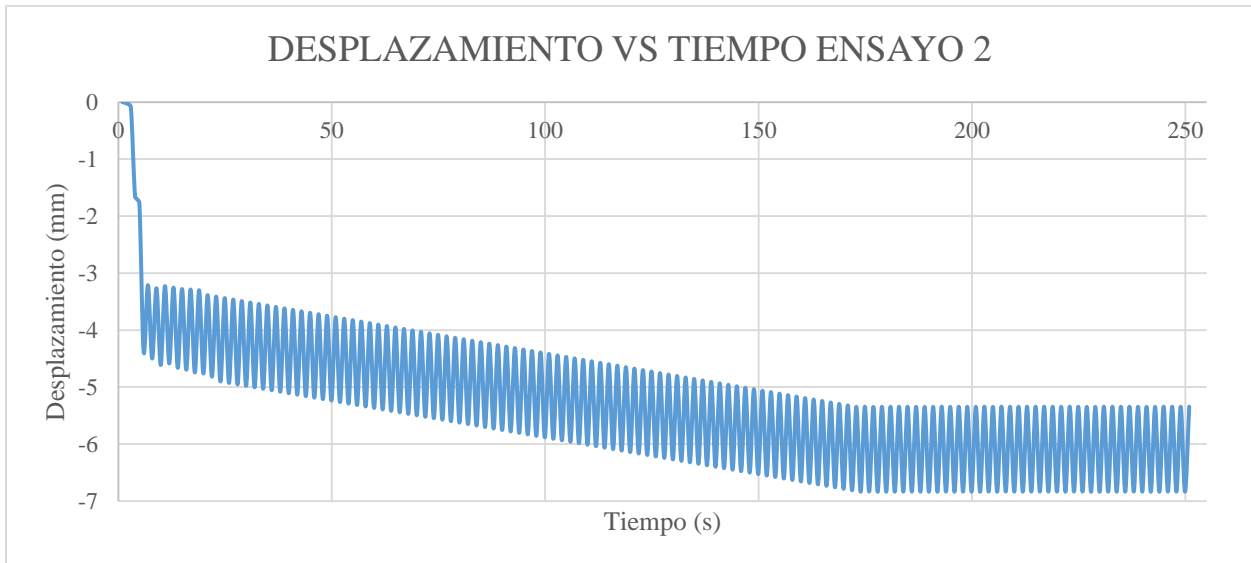


Apéndice D *Gráficas desplazamiento vs tiempo Modelo 4*

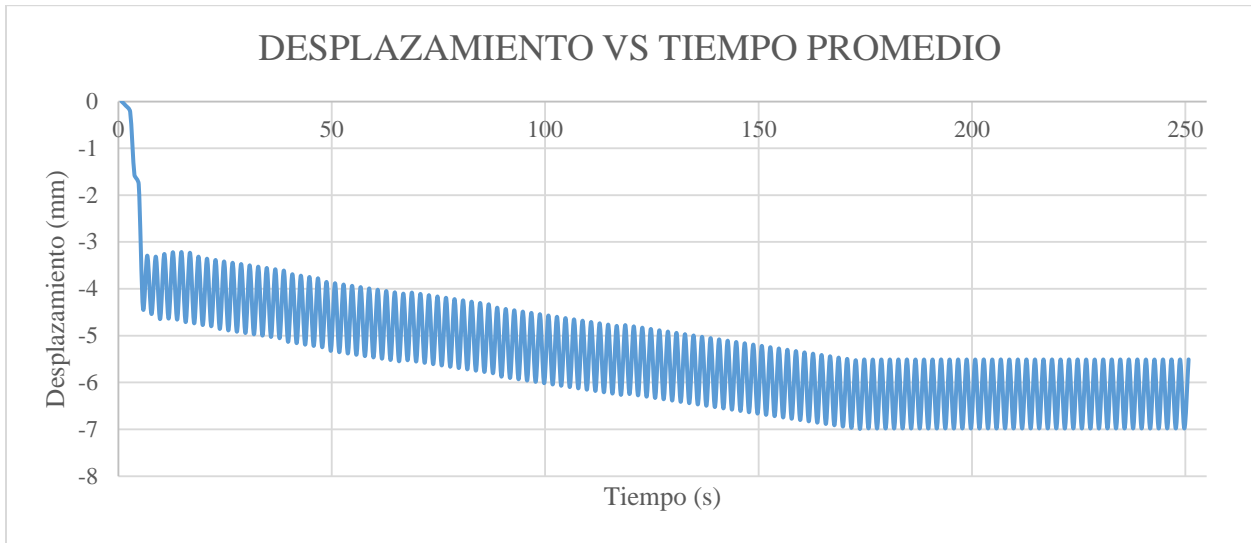
Ensayo 1



Ensayo 2



Promedio



Zona estable promedio

