

**Estudio del comportamiento mecánico de mezclas de suelos y desechos plásticos – caso
inconfinado**

Anggy Zuley Castro Otero

Jhorman Ignacio Silva Gonzalez

Proyecto de grado presentado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

Jorge Alejandro Mendoza

Doctor of Philosophy

Codirector:

Vladimir Merchan

Doctor en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2018

Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Planteamiento y Justificación	13
2. Generalidades de los materiales	14
2.1 Extracción del suelo	14
2.2 Agregados Plásticos	14
3. Metodología del Proyecto	15
3.1 Caracterización del suelo	15
3.1.1 Ensayo de Granulometría.....	15
3.1.2 Ensayo Límites de Atterberg	16
3.1.3 Ensayo Modificado de Compactación (Proctor Modificado).....	16
3.2 Caracterización del material plástico	17
3.4 Compresión inconfiada en muestras de suelo	18
3.4.1 Preparación de la Muestra.....	18
3.4.2 Ensayo Compresión Inconfiada	19
3.5 Compresión inconfiada en muestras de suelo – plástico	20
3.5.1 Preparación de la Muestra.....	20
3.5.2 Ensayo Compresión Inconfiada Muestra Suelo – Plástico.....	22
4. Análisis de los resultados.....	23

4.1 Clasificación del Suelo	23
4.1.1 Granulometría del Suelo	23
4.1.2 Límites de Atterberg.	24
4.2 Humedad óptima del suelo.....	25
4.3 Energía de Compactación de las probetas.	27
4.3.1 Energía de compactación Proctor Modificado.....	27
4.3.2 Energía de compactación para moldeo de probetas	27
4.4 Compresión inconfiada muestras de suelo.....	28
4.5 Compresión inconfiada en muestras de Suelo - Plástico	29
4.5.1 Probetas Suelo – Plástico al 0.5%	29
4.5.2 Probetas Suelo – Plástico al 1%	30
4.5.3 Probetas Suelo-Plástico al 1.5%	31
4.5.4 Probetas Suelo-Plástico al 2%	31
4.6 Consistencia del Suelo	32
4.7 Variación Promedio de la Resistencia	32
5. Conclusiones	34
6. Recomendaciones	35
Referencias Bibliográficas	36
Apéndices.....	38

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Ubicación del suelo extraído.	14
Figura 2. Agregados Plásticos.....	15
Figura 3. Ensayo de granulometría.	16
Figura 4. Límites de Atterberg.....	16
Figura 5. Ensayo de Proctor Modificado.	17
Figura 6. Material Plástico triturado y tamizado.	18
Figura 7. Preparación de Muestra de Suelo.	18
Figura 8. Ensayo Compresión Inconfinada Muestra de Suelo.....	20
Figura 9. Preparación de Muestra Suelo-Plástico.	20
Figura 10. Ensayo Compresión Inconfinada Muestra Suelo – Plástico.....	22
Figura 11. Curva Granulométrica.	24
Figura 12. Gráfica Límite Líquido.....	24
Figura 13. Curva Humedad Óptima.....	26
Figura 14. Esfuerzo - Deformación Muestras de Solo Suelo.....	28
Figura 15. Esfuerzo - Deformación Muestras al 0.5% de Plástico.	29
Figura 16. Esfuerzo - Deformación Muestras al 1% de Plástico.	30
Figura 17. Esfuerzo - Deformación Muestras al 1.5% de Plástico.	31
Figura 18. Esfuerzo-Deformación Muestras al 2% de Plástico.	31

Figura 19. Variación Promedio de la resistencia a la compresión inconfiada. 33

Figura 20. Variación Promedio de la resistencia a la compresión inconfiada. 33

Listas de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Granulometría del suelo.....	23
Tabla 2. Límite Líquido.	24
Tabla 3. Límite Plástico.	25
Tabla 4. Clasificación SUCS.	25
Tabla 5. Datos del ensayo Proctor Modificado.....	26
Tabla 6. Parámetros para el cálculo de Energía (Proctor Modificado).....	27
Tabla 7. Parámetros para el cálculo de Energía.....	28
Tabla 8. Propiedades Probetas Solo Suelo.....	29
Tabla 9. Propiedades Probetas con Agregado Plástico al 0.5%.....	30
Tabla 10. Propiedades Probetas con Agregado Plástico al 1%.....	30
Tabla 11. Propiedades Probetas con Agregado Plástico al 1.5%.....	31
Tabla 12. Propiedades Probetas con Agregado Plástico al 2%.....	32
Tabla 13. Consistencia del Suelo.	32
Tabla 14. Variación Resistencia a la compresión inconfínada.	33

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. De los materiales plásticos.....	38
Apéndice B. Proceso de curado	42
Apéndice C. Curado mezcla suelo – plástico.....	45

Resumen

Título: Estudio del comportamiento mecánico de mezclas de suelos y desechos plásticos – caso inconfinado *

Autores: Anggy Zuley Castro Otero
Jhorman Ignacio Silva Gonzalez**

Palabras Claves: Suelo, Plástico, Reciclaje, Diseño de probetas, Ensayo de Compresión Inconfinada..

En este trabajo se presentan los resultados del estudio experimental de mezclas de suelo y desechos plásticos, sometidas a pruebas de compresión inconfinada de acuerdo a la norma INVIAS I.N.V.E – 152; para ello se dividió el proyecto en tres fases principales, realizando el análisis de la resistencia a la compresión inconfinada a un total de 15 probetas finales con dimensiones estándar. La fase uno del proyecto consistió en la elaboración y análisis de probetas fabricadas de solo suelo cuyas partículas no excedieron un tamaño de 4.75 mm, partículas que fueron obtenidas mediante un proceso de tamizado, la elaboración y análisis de las probetas se realizó una vez caracterizado el suelo a utilizar en el estudio. A continuación en la fase dos del proyecto, se diseñaron, elaboraron, curaron y ensayaron probetas con mezcla suelo-plástico (el plástico utilizado fue totalmente reciclado) cuyas partículas no excedieron un tamaño de 2 mm, de igual forma las partículas del diámetro mencionado fueron obtenidas por tamizado, y el porcentaje de plástico agregado fue variable dentro de un rango de 0% hasta 2.0% del peso total de cada probeta. Para finalizar, la fase tres del proyecto consistió en la comparación de los resultados obtenidos a partir de los ensayos de compresión inconfinada., construyendo graficas de esfuerzo contra deformación unitaria para calcular el valor de resistencia correspondiente a cada probeta.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil Director: Jorge Alejandro Mendoza
Codirector: Vladimir Merchan

Abstract

Title: Study of the mechanical behavior of mixtures of soils and plastic waste - unconfined case *

Authors: Anggy Zuley Castro Otero
Jhorman Ignacio Silva Gonzalez **

Keywords: Soil, Plastic, Recycling, Test tube design, Unconfined Compression Test.

The present study evaluated the mechanical behavior of samples comprised of a mixture of soil and plastic using the Unconfined Compression Test (UCT) based on INVIAS technical standard I.N.V.E - 152. This was achieved by performing the analysis of the unconfined compression strength to a total of 15 samples with standard dimensions. The project was divided into three different phases: The first phase dealt with the physical characterization of the soil used in this study, the elaboration and analysis of samples made out of soil with particles not exceeding a size of 4.75 mm, the particles were obtained by a sieving process. In the second phase, samples with particles that did not exceed a size of 2 mm and that were comprised of a soil-plastic mixture (the plastic used was completely recycled), were designed, processed, cured thermally and tested, similarly the used particles were obtained by a sieving process. The percentage of added plastic in the samples was variable, the soil-plastic samples were elaborated and designed with mixing ratios varying from 0.5% to 2% of plastic to soil. Finally, the last phase involved the assessment of the unconfined compressive strength results, constructing stress against unit deformation graphs for calculate the resistance value corresponding to each samples.

* Project of grade

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering, School of Civil Engineering Director: Jorge Alejandro Mendoza
Codirector: Vladimir Merchan

Introducción

El suelo desde el punto de vista ingenieril, es una mezcla de minerales y materia orgánica que se encuentra en la superficie de la tierra (Villalaz, 2004), su función es servir como soporte a las obras que ha construido el hombre a lo largo de la historia; capaz de resistir las cargas transmitidas por la construcción de dicho proyecto. Así mismo, la resistencia del suelo depende de múltiples factores entre ellos la cantidad de agua que contiene, lo que en muchas ocasiones causa que el suelo no alcance la resistencia requerida para un determinado proyecto.

Actualmente se conocen distintas formas de estabilizar un suelo; tales como, geotextiles, geosintéticos, estabilización por cal, geogrillas con materiales polímeros, entre otros (S.A.S, 2016); que representan sobrecostos para el proyecto. Por otro lado, la producción de desechos plásticos en Colombia ha presentado un aumento significativo en los últimos años, debido a esto, se pretende buscar una nueva forma de reutilizar dichos desechos que permitan la reducción en los costos del proyecto y a su vez una disminución en el impacto ambiental, por lo que surge la idea de aprovechar estos recursos mediante procesos de análisis que permitan estudiar su influencia en suelos.

1. Planteamiento y Justificación

En la actualidad uno de los grandes problemas a nivel mundial es la contaminación, específicamente aquella producida por la elaboración y desechos de materiales plásticos. Desafortunadamente, los plásticos al ser utilizados una sola vez pasan a ser parte de los residuos sólidos mal llamados “Basuras” los que afectan directamente el ambiente (Agua - Aire - Suelo), a causa de las deficientes políticas que exijan reciclar este tipo de materiales, así como su uso desmedido por parte de la población.

Según cifras publicadas por la Asociación de Productores de Plástico de Europa PLASTICSEUROPE (PlasticEurope, 2016) para el año 2015 la producción mundial de plástico alcanzó los 270 millones de toneladas y prevé un incremento del 4% hasta el año 2030; en países desarrollados como Holanda el 99% de los residuos sólidos son aprovechados como materias primas para la industria, en Alemania solo el 2% de los residuos totales terminan en un relleno sanitario, mientras que en Colombia solo el 17% de las 11.6 millones de toneladas de los residuos generados son aprovechados (T., 2016).

Por otra parte, en ingeniería civil, una de las características de los suelos es la capacidad de este para soportar carga. Los suelos en algunas ocasiones no presentan las propiedades mecánicas requeridas para ciertos proyectos. Teniendo en cuenta que el plástico es un material en abundancia, y su reciclaje y/o reutilización es escasa en nuestro medio, surge la idea de investigar si las propiedades mecánicas del suelo pueden ser mejoradas mediante su combinación con plástico, específicamente su resistencia a la compresión inconfina.

2. Generalidades de los materiales

2.1 Extracción del suelo

La muestra de suelo requerido en la fabricación de probetas para el ensayo de compresión inconfiada fue extraída de una obra en construcción ubicada sobre la carrera 24 con Quebrada Seca en la ciudad de Bucaramanga como se puede observar en la Figura 1.

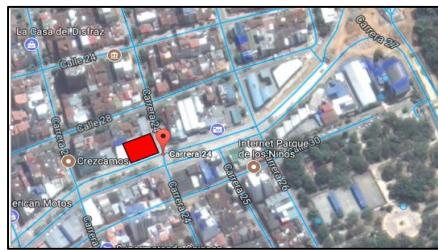


Figura 1 Ubicación del suelo extraído.

2.2 Agregados Plásticos

Para la fabricación de probetas con partículas plásticas, se realizó una revisión bibliográfica sobre las características y los diferentes tipos de plásticos en la industria, se seleccionó un plástico PET (Polietileno Tereftalato) y una mezcla entre PEBD Y PEAD (polietileno de baja y alta densidad respectivamente) con potencial para el análisis; se obtuvo por medio de la empresa **Replasander Ltda.**, ubicada en el municipio de Girón -Santander. El porcentaje a utilizar en cada probeta fue estimado a prueba y error basados en ensayos preliminares.



Figura 2. Agregados Plásticos.

3. Metodología del Proyecto

3.1 Caracterización del suelo

Los ensayos requeridos para el correcto desarrollo del procedimiento estipulado en la norma I.N.V.E – 152 (INVIAS, www.invias.gov.co, 2014) compresión inconfiada en muestras de suelos, se llevaron a cabo en las instalaciones del laboratorio Álvaro Beltrán Pinzón de la Universidad Industrial de Santander (UIS) y fueron realizadas bajo la respectiva asesoría de los técnicos a cargo.

3.1.1 Ensayo de Granulometría El ensayo de granulometría se realizó con el fin de obtener el tamaño de las partículas de la muestra de suelo, siguiendo las estipulaciones contempladas en la norma I.N.V.E – 123 (INVIAS, www.invias.gov.co, 2014). El peso inicial de la muestra de suelo para el ensayo fue de 1000 gramos.



Figura 3. Ensayo de granulometría.

3.1.2 Ensayo Límites de Atterberg Para determinar la plasticidad de un suelo, se deben conocer parámetros tales como el límite líquido y el límite plástico del mismo, para este cálculo se llevan a cabo los procedimientos establecidos por las normas I.N.V.E – 125 y I.N.V.E – 126 (INVIAS, www.invias.gov.co, 2014).



Figura 4. Límites de Atterberg.

3.1.3 Ensayo Modificado de Compactación (Proctor Modificado). Para la elaboración de las probetas a utilizar en el ensayo de compresión inconfiada se utilizó en su procedimiento de diseño la humedad óptima; entre tanto, para el cálculo de dicha humedad se tuvo en cuenta el

procedimiento establecido en la norma I.N.V.E – 142 (INVIAS, www.invias.gov.co, 2014), que tiene como objetivo determinar la relación entre la humedad y la masa unitaria del suelo compactado.

En la ejecución de este ensayo, se utilizó un molde con dimensiones: 115 mm (4.5”) de alto, 100 mm (4”) de diámetro; y un martillo con un peso de 4.54 kilogramos que cae desde una altura de 457.2 mm (18”).



Figura 5. Ensayo de Proctor Modificado.

3.2 Caracterización del material plástico

Una vez obtenido el material plástico, se procedió a tamizarlo para separarlo en partículas que pudieran acercarse a la granulometría del suelo, con el fin de garantizar así una homogeneidad en la mezcla. Seguido, en la realización de las probetas se escogieron partículas de plástico cuyos tamaños no excedieron un diámetro de 2 mm (Tamiz N°10).



Figura 6. Material Plástico triturado y tamizado.

3.4 Compresión inconfiada en muestras de suelo

3.4.1 Preparación de la Muestra



Figura 7. Preparación de Muestra de Suelo.

- Una vez clasificada la muestra de suelo y definida su humedad óptima, se procedió a pesar 2000 gramos de suelo cuyas partículas pasaron el Tamiz N° 4 por cada probeta realizada.

- Para el moldeo de las probetas se utilizó una horma circular de 80 mm (3.15”) de diámetro y 150 mm (6”) de alto; un martillo cuyo peso es de 5.5 libras que cae desde una altura de 304.8 mm (12”).
- Con el fin de mantener constante la energía de compactación con la que se realizó el Proctor Modificado, las probetas para el ensayo se moldearon en 5 capas y 34 golpes por cada una.
- Se preparó el molde a trabajar lubricando su parte interna y fondo evitando posible adherencia de partículas de suelo en las paredes del mismo.
- Dentro de un recipiente se agregó el suelo anteriormente tamizado y el volumen correspondiente al porcentaje de humedad óptimo obtenido del ensayo de Proctor Modificado que para este caso es del 6.8%, a continuación se mezcló todo de manera uniforme garantizando la homogeneidad de la muestra.
- Luego de compactadas las probetas, se retiró el collar de extensión y se recortó el exceso de suelo en la parte superior del molde con ayuda de la regla metálica.
- De forma inmediata, se determinó la masa de cada probeta y se realizó un proceso de secado al horno durante aproximadamente 4 horas con un control de la misma cada 15 minutos.

3.4.2 Ensayo Compresión Inconfinada

- Se determinó la masa de la muestra antes del ensayo.
- Con la colaboración del técnico a cargo, se procedió a realizar el respectivo ensayo a una velocidad de aplicación de la falla de 1 mm/min; teniendo en cuenta que el ensayo se realizó en la misma dirección de compactación.

- Por último, se analizaron los resultados del ensayo (relación carga – Deformación) proporcionados por el operario.



Figura 8. Ensayo Compresión Inconfinada Muestra de Suelo.

3.5 Compresión inconfinada en muestras de suelo – plástico

3.5.1 Preparación de la Muestra



Figura 9. Preparación de Muestra Suelo-Plástico.

- Una vez clasificada la muestra de suelo y definida su humedad óptima, se procedió a pesar 2000 gramos de suelo cuyas partículas pasaron el Tamiz N° 4 por cada probeta realizada.
- Para el moldeo de las probetas se utilizó una horma circular de 80 mm (3.15”) de diámetro y 150 mm (6”) de alto; un martillo cuyo peso es de 5.5 libras que cae desde una altura de 304.8 mm (12”).
- Con el fin de mantener constante la energía de compactación con la que se realizó el Proctor Modificado, las probetas para el ensayo se moldearon en 5 capas y 34 golpes por cada una.
- Se realizó la clasificación de partículas plásticas cuyo tamaños no excedían un diámetro de 2 mm, inmediatamente después se pesó el material tomando muestras del 0.5%, 1%, 1.5% y 2% de la cantidad del suelo utilizado para cada probeta (2000 gramos), asignando a cada porcentaje tres muestras de material.
- Se preparó el molde a trabajar lubricando su parte interna y fondo evitando posible adherencia de partículas de suelo en las paredes del mismo. De forma simultánea, dentro de un recipiente se agregó el suelo anteriormente tamizado, el porcentaje de plástico correspondiente y el volumen de humedad óptimo obtenido del ensayo de Proctor Modificado que para este caso es del 6.8%, finalmente se mezcló todo de manera uniforme garantizando la homogeneidad de la muestra.
- Luego de compactadas las probetas, se retiró el collar de extensión y se recortó el exceso de suelo en la parte superior del molde con ayuda de la regla metálica.
- De forma inmediata, se determinó la masa de cada probeta y se realizó un proceso de pre-secado al ambiente durante aproximadamente 3 días con control de la misma cada 24 horas.
- Para realizar el respectivo curado, las probetas se sometieron a un delta de temperatura logrando que la mezcla Suelo-Plástico sea más uniforme. Estas se mantuvieron en el horno

durante 4 horas con una temperatura inicial de 60 ° C y con un incremento de 20°C cada hora.

- Para finalizar el proceso de preparación de la muestras, las probetas permanecieron en etapa de estabilización al ambiente hasta que la diferencia en su masa no se consideró significativa, se registraron datos de sus pesos cada 3 días.

3.5.2 Ensayo Compresión Inconfinada Muestra Suelo – Plástico.

- Se determinó la masa de la muestra antes del ensayo.
- Con la colaboración del técnico a cargo, se procedió a realizar el respectivo ensayo a una velocidad de aplicación de la falla de 1.5 mm/min; teniendo en cuenta que el ensayo se realizó en la misma dirección de compactación.
- Por último, se analizaron los resultados del ensayo (relación carga – Deformación) proporcionados por el operario.



Figura 10. Ensayo Compresión Inconfinada Muestra Suelo – Plástico.

4. Análisis de los resultados

4.1 Clasificación del Suelo

4.1.1 Granulometría del Suelo La descripción cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo, se determinó mediante el cálculo del porcentaje de suelo que pasa por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo, los resultados se encuentran contemplados en la siguiente tabla.

Tabla 1.

Granulometría del suelo.

MALLA N°	ABERTURA [mm]	PESO SUELO RETENIDO [gr]	PORCIENTO RETENIDO PARCIAL [%]	PORCIENTO RETENIDO ACUMULADO [%]	% QUE PASA LA MALLA [%]
2"	50.8	0	0.00	0.00	100.00
1 1/2 "	36.1	0	0.00	0.00	100.00
1"	25.4	0	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.05	11.9	1.32	1.32	98.68
1/2"	12.7	28.6	3.18	4.51	95.49
3/8"	9.52	11.6	1.29	5.80	94.20
N° 4	4.75	25.8	2.87	8.67	91.33
10	2	23.9	2.66	11.32	88.68
20	0.84	21.8	2.43	13.75	86.25
40	0.42	83.1	9.24	22.99	77.01
60	0.25	133	14.80	37.79	62.21
100	0.149	126.7	14.10	51.89	48.11
200	0.074	90.8	10.10	61.99	38.01
Fondo	****	338	37.60	99.59	0.41

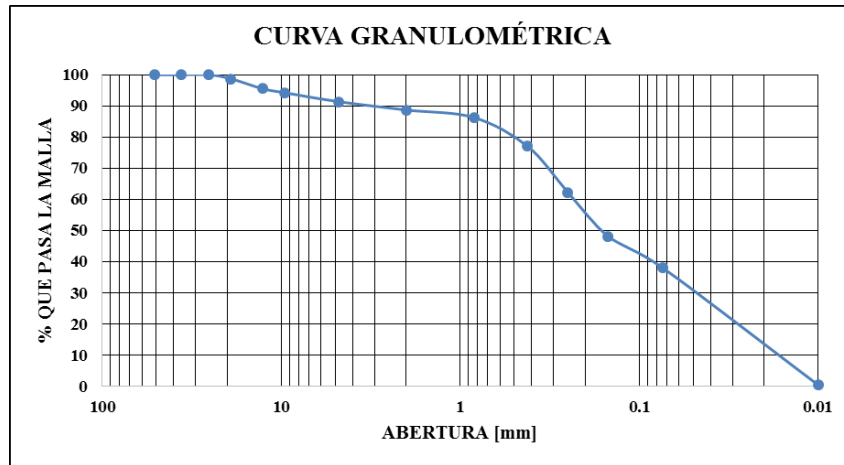


Figura 11. Curva Granulométrica.

4.1.2 Límites de Atterberg. En las siguientes tablas se expresan los valores obtenidos de forma práctica en el laboratorio una vez fueron realizados los ensayos correspondientes al contenido de agua del suelo.

Tabla 2.

Límite Líquido.

NOMBRE TARA	Nº DE GOLPES	PESO DE LA TARA [g]	PESO TARA + SUELO HUMEDO [g]	PESO TARA + SUELO SECO [g]	PESO DEL AGUA [g]	PESO DEL SUELO SECO [g]	CONTENIDO DE AGUA [%]
4	45	4.6	28.6	23.9	4.7	19.3	24.35
M2	34	5.3	29.3	24.5	4.8	19.2	25.00
T2	23	5.4	28.3	23.4	4.9	18	27.22
3	12	5.2	27.9	22.5	5.4	17.3	31.21

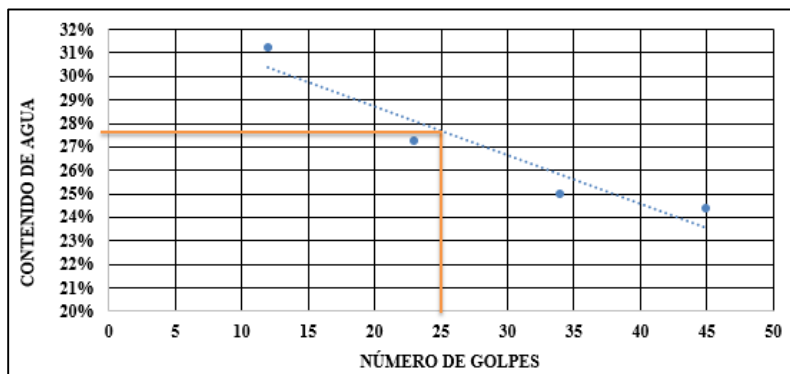


Figura 12. Gráfica Límite Líquido.

Tabla 3.

Límite Plástico.

NOMBRE TARA	PESO DE LA TARA [g]	PESO TARA + SUELO HUMEDO [g]	PESO TARA + SUELO SECO [g]	PESO DEL AGUA [g]	PESO DEL SUELO SECO [g]	CONTENIDO DE AGUA [%]
5	5.6	15.3	13.8	1.5	8.2	18.29
2	5.4	16.7	14.8	1.9	9.4	20.21
LÍMITE PLÁSTICO =						19.25

Tabla 4.

Clasificación SUCS.

LÍMITE LÍQUIDO [%] :	27.6 ≈ 28
LÍMITE PLÁSTICO [%] :	19.25 ≈ 19
ÍNDICE DE PLASTICIDAD:	8.35 ≈ 8
CLASIFICACIÓN SUCS :	SC

Con estos resultados se clasificó la muestra según la metodología SUCS, mostrando que el suelo que se utilizó en el análisis es una **Arena Arcillosa (SC)**.

Nota: Suelo Sc (Arena Arcillosa). Material con cantidad apreciable de finos plásticos, en este grupo el contenido de finos afecta las características de resistencia y esfuerzo-deformación y la capacidad de drenaje libre de la fracción gruesa, esto ocurre para porcentajes superiores al 12%, en peso, por lo que esa cantidad se toma como frontera inferior de dicho contenido de partículas finas. La plasticidad de los finos en este grupo varía de media a alta situándose sobre la línea A en la carta de Casagrande (Badillo & Rodríguez, 2005).

4.2 Humedad óptima del suelo

Después de realizar el respectivo procedimiento según la normatividad correspondiente, se determinó experimentalmente que la densidad seca y la humedad óptima del suelo es la siguiente:

Tabla 5.

Datos del ensayo Proctor Modificado.

RELACIÓN DENSIDAD - HUMEDAD (PROCTOR MODIFICADO) INV E - 142						
MUESTRA N°	1		2		3	
PESO DEL TARRO (g)	4.60	8.30	8.30	8.40	8.40	5.40
PESO DEL TARRO+MUESTRA HÚMEDA (g)	75.30	71.70	67.90	59.60	52.50	50.50
PESO DEL TARRO+ MUESTRA SECA (g)	72.70	68.50	63.90	56.30	48.20	46.20
PESO DEL AGUA (g)	2.60	3.20	4.00	3.30	4.30	4.30
PESO DEL MATERIAL SECO (g)	68.1	60.2	55.6	47.9	39.8	40.8
CONTENIDO DE HUMEDAD	3.82	5.32	7.19	6.89	10.80	10.54
% PROMEDIO	4.57		7.04		10.67	

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD			
CONTENIDO DE HUMEDAD %	4.57	7.04	10.67
PESO DEL SUELO+MOLDE (g)	6117	6170	6183
PESO DEL MOLDE (g)	4318	4318	4318
PESO DEL SUELO (g)	1799	1852	1865
DENSIDAD HÚMEDA (g/cm ³)	1.992	2.050	2.065
DENSIDAD SECA (g/cm ³)	1.905	1.916	1.866
	Densidad Máxima (g/cm ³)		1.917
	Humedad Óptima %		6.80

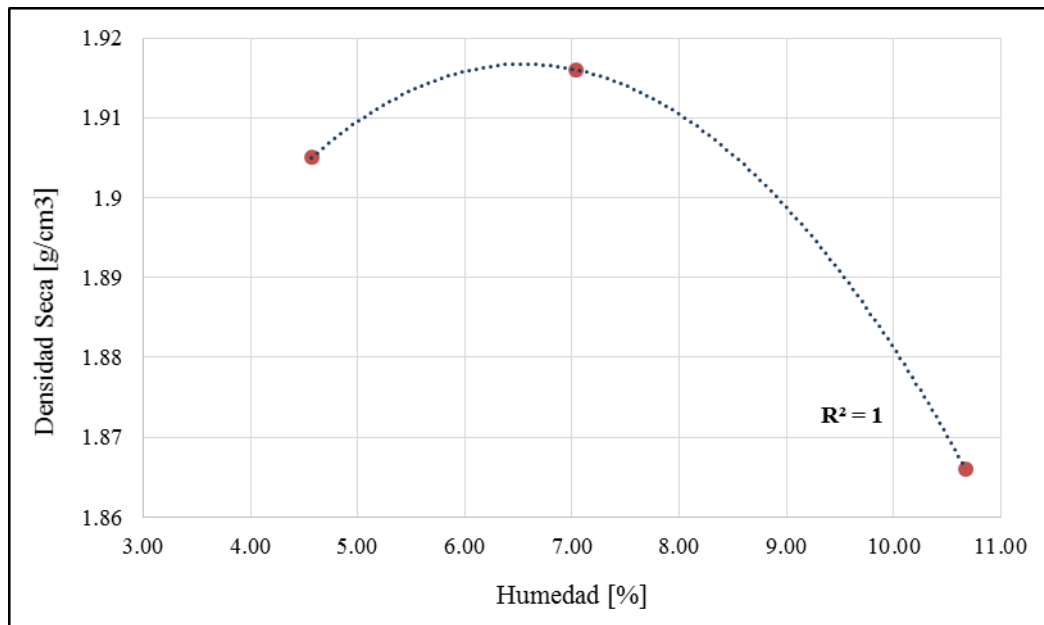


Figura 13. Curva Humedad Óptima.

Este volumen de agua correspondiente al porcentaje de humedad óptima del suelo se utilizó para el correcto moldeo de las probetas.

4.3 Energía de Compactación de las probetas.

4.3.1 Energía de compactación Proctor Modificado La energía de compactación utilizada en el ensayo de Proctor Modificado, se halló en función de parámetros tales como: número de golpes por capas, número de capas, peso del martillo, altura de caída del mismo y volumen del molde.

$$E = \frac{(\text{Número de golpes por capa}) * (\text{Número de Capas}) * (\text{Peso del Martillo}) * (\text{Altura de caída del martillo})}{\text{Volumen del molde}}$$

Ecuación 1. Energía de Compactación.

Tabla 6.

Parámetros para el cálculo de Energía (Proctor Modificado).

Peso del Martillo [lb]	10
Caída del Martillo [cm]	45.72
Volumen del Molde [cm ³]	903.21
Número de Capas	3
Número de Golpes	25

$$E = \frac{10 * 45.72 * 3 * 25}{903.21} = 37.96 \frac{lb}{cm^2}$$

Ecuación 2. Cálculo de Energía de Compactación

4.3.2 Energía de compactación para moldeo de probetas Debido a que para la elaboración de las probetas se utilizaron distintos equipos (molde - martillo) y con el fin de mantener constante la energía de compactación, de la formula anterior se despejaron parámetros como el número de golpes y el número de capas, concluyendo que estos datos son:

Tabla 7.

Parámetros para el cálculo de Energía.

Peso del Martillo [lb]	5.5
Caída del Martillo [cm]	30.48
Volumen del Molde [cm ³]	753.98
Número de Capas	5
Número de Golpes	34

$$E = \frac{5.5 * 30.48 * 5 * 34}{753.98} = 37.96 \frac{lb}{cm^2}$$

Ecuación 3. Cálculo Energía de Compactación - Nuevos Parámetros.

4.4 Compresión inconfiada muestras de suelo.

A continuación se presentan las gráficas que relacionan la variación entre el esfuerzo – deformación, obtenidas del ensayo de compresión inconfiada a muestras de solo suelo.

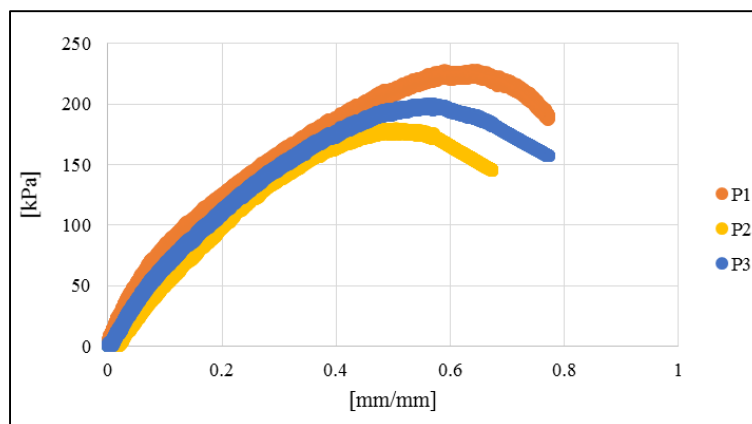


Figura 14. Esfuerzo - Deformación Muestras de Solo Suelo.

Tabla 8.

Propiedades Probetas Solo Suelo.

Muestra Suelo	q_u [kPa]	Humedad w [%]	Peso Unitario Seco γ_d [g/cm ³]
P1	228.2	6.23	1.81
P2	179.9	6.34	1.78
P3	200.4	6.29	1.80

4.5 Compresión inconfiada en muestras de Suelo - Plástico

Enseguida se presentan las gráficas que relacionan la variación entre el esfuerzo – deformación, obtenidas del ensayo de compresión inconfiada a muestras de suelo-plástico.

4.5.1 Probetas Suelo – Plástico al 0.5%

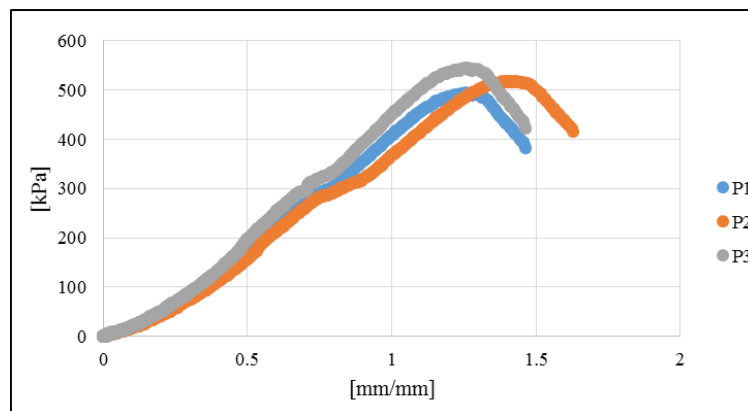


Figura 15. Esfuerzo - Deformación Muestras al 0.5% de Plástico.

Tabla 9.

Propiedades Probetas con Agregado Plástico al 0.5%.

Muestra Suelo al 0.5% de agregado plástico	q_u [kPa]	Humedad w [%]	Peso Unitario Seco γ_d [g/cm ³]
P1	494.5	6.23	1.74
P2	518.3	6.19	1.76
P3	545.6	5.89	1.79

4.5.2 Probetas Suelo – Plástico al 1%

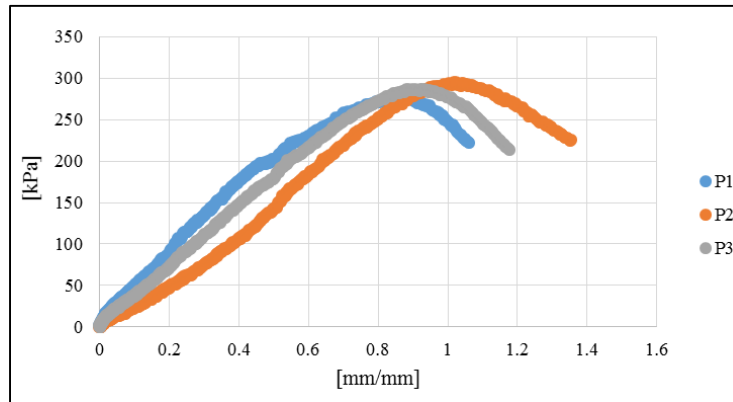


Figura 16. Esfuerzo - Deformación Muestras al 1% de Plástico.

Tabla 10.

Propiedades Probetas con Agregado Plástico al 1%.

Muestra Suelo al 1 % de agregado plástico	q_u [kPa]	Humedad w [%]	Peso Unitario Seco γ_d [g/cm ³]
P1	278.7	6.23	1.74
P2	295.6	6.38	1.76
P3	287.2	6.23	1.75

4.5.3 Probetas Suelo-Plástico al 1.5%

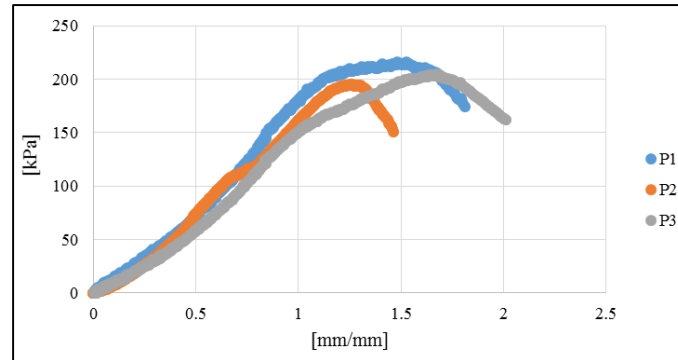


Figura 17. Esfuerzo - Deformación Muestras al 1.5% de Plástico.

Tabla 11.

Propiedades Probetas con Agregado Plástico al 1.5%.

Muestra Suelo al 1.5 % de agregado plástico	q_u [kPa]	Humedad w [%]	Peso Unitario Seco γ_d [g/cm ³]
P1	216.3	6.23	1.74
P2	195.5	6.46	1.70
P3	204.6	6.22	1.71

4.5.4 Probetas Suelo-Plástico al 2%

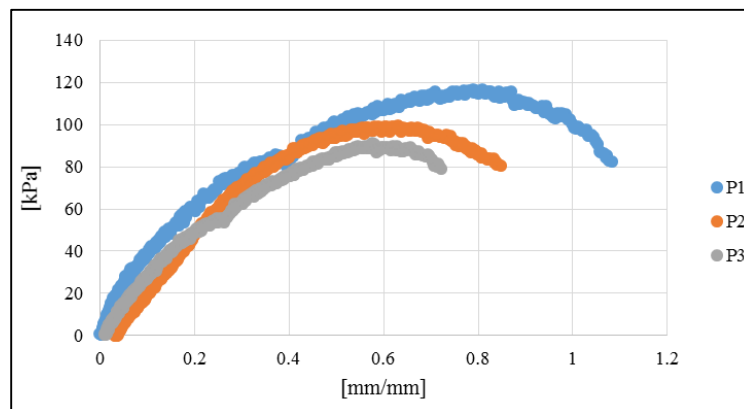


Figura 18. Esfuerzo-Deformación Muestras al 2% de Plástico.

Tabla 12.

Propiedades Probetas con Agregado Plástico al 2%.

Muestra Suelo al 2 % de agregado plástico	q_u [kPa]	Humedad w [%]	Peso Unitario Seco γ_d [g/cm ³]
P1	116.8	5.99	1.77
P2	99.6	6.16	1.71
P3	91.1	6.38	1.69

4.6 Consistencia del Suelo

La resistencia a la compresión inconfiada se empleó para calificar la consistencia del suelo como muy blanda, blanda, mediana, firme, muy firme y dura según lo estipulado en la norma I.N.V.E - 152 – 07 (INVIAS, www.unicauca.edu.co, 2008).

Tabla 13.

Consistencia del Suelo.

Agregado Plástico [%]	Resistencia a la Compresión Inconfiada q_u [kPa]	Consistencia del Suelo
0,0	179.9 - 228.2	Firme
0,5	494.5 - 545.6	Dura
1,0	278.7 - 295.6	Muy Firme
1,5	195.5 - 216.3	Firme
2,0	91.1 - 116.8	Mediana

4.7 Variación Promedio de la Resistencia

A continuación se muestra la variación de la resistencia a la compresión inconfiada en función de la cantidad de agregado plástico.

Tabla 14.

Variación Resistencia a la compresión inconfiada.

q _u [kPa]	AGREGADO PLÁSTICO [%]				
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
q _u Min.	179.9	494.5	278.7	195.5	91.1
q _u Max.	228.2	545.6	295.6	216.3	116.8
q _u Prom.	204.1	520.1	287.2	205.9	104.0

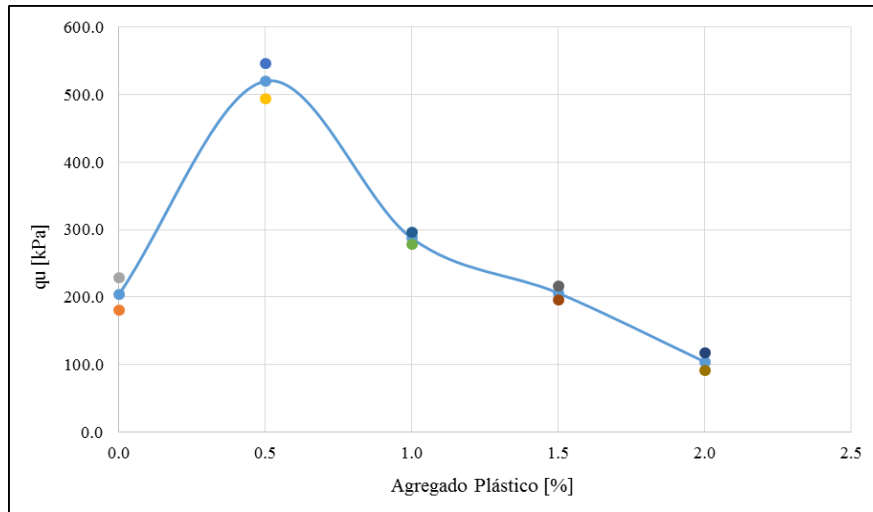


Figura 19. Variación Promedio de la resistencia a la compresión inconfiada.

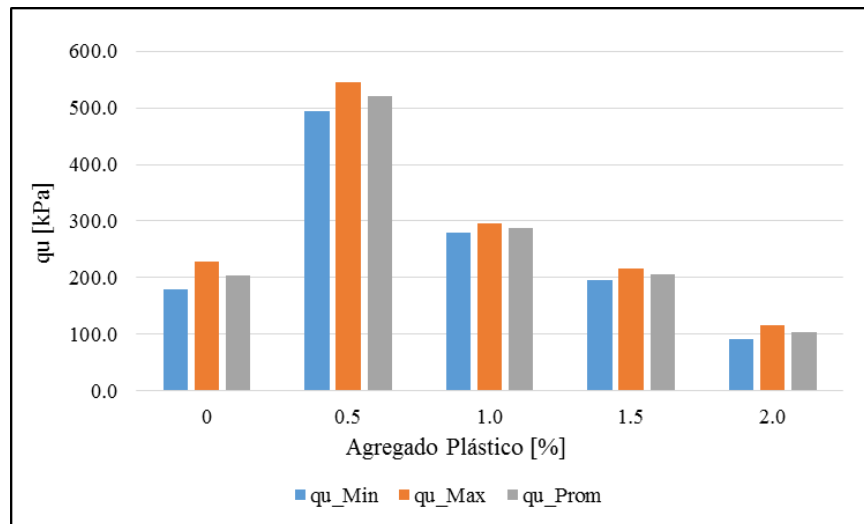


Figura 20. Variación Promedio de la resistencia a la compresión inconfiada.

5. Conclusiones

- Para el desarrollo del proyecto se determinó utilizar material plástico tipo PET (Polietileno tereftalato) y una mezcla entre PEBD y PEAD (polietileno de baja y alta densidad respectivamente) debido al impacto ambiental causado por su acelerada demanda y producción. Además la facilidad en obtener partículas con un diámetro menor a 2 mm luego de ser sometido a un proceso de triturado.
- Probando diferentes alternativas para la cantidad de agregado plástico se evidenció que los porcentajes ideales oscilaban entre 0% y 2%, visto que el moldeado más adecuado se obtuvo a partir de estos porcentajes.
- Gracias a la aplicación del método de prueba y error durante el proceso de curado, se encontró que la manera más adecuada de aplicarlo a las probetas fue por medio de un pre-secado al ambiente, seguido de un secado gradual al horno y estabilización final al aire.
- Según los resultados obtenidos y con base en su respectivo análisis, se concluyó que la resistencia a la compresión inconfiada de mezclas Suelo-Plástico aumentó significativamente cuando su porcentaje de agregado plástico oscila alrededor del 0.5% comparada a una cuyo único componente es suelo. Así mismo, se observó que para mezclas con agregados plásticos entre 1% y 1.5% su resistencia aumentó ligeramente en comparación con las probetas de suelo sin plástico.

- En cuanto a mezclas con agregados plásticos del 2%, se apreció una disminución de la resistencia a la compresión inconfiada en comparación a muestras cuyo único componente fue suelo.
- La resistencia a la compresión inconfiada para muestras de una misma tipología presentó variaciones inducidas por los cambios en la densidad interna y el contenido de humedad entre cada probeta, sin descartar posibles errores humanos condicionados a la realización y control del todo el proceso.

6. Recomendaciones

- Avanzar en el estudio del comportamiento mecánico de muestras Suelo-Plástico en porcentajes en los que se evidencia un aumento significativo de su resistencia.
- Desarrollar nuevas investigaciones en mezclas de Suelo-Plástico sobre su resistencia inconfiada, teniendo en cuenta diferentes tipos de suelo.
- Realizar estudios acerca de la variación que pueda inducir agregados plásticos no solo en partículas sino también en fibras.
- Aplicar otros tipos de ensayos como Triaxial dinámico, Triaxial estático, etc., en los cuales se pueda obtener datos más precisos.
- Promover el uso de material plástico reciclado como un agregado con gran potencial para el mejoramiento de suelo en Ingeniería Civil.

Referencias Bibliográficas

- (Acoplásticos), A. C. (s.f.). *www.acoplásticos.org*. Recuperado el Febrero de 2018, de <http://www.acoplásticos.org/mdr2/>
- Badillo, E. J., & Rodríguez, A. R. (2005). *Mecánica de Suelos*. México: Limusa Noriega Editores.
- Carreteras, A. T. (04 de Septiembre de 2014). *www.normativadecarreteras.com/*. Recuperado el 10 de Febrero de 2018, de <http://normativa.itafec.com/materiales-de-construccion/ES.11.01.067.OM.pdf>
- Concreto, T. d. (Marzo de 2015). *www.tecnologia17118.blogspot.com.co*. (Tania Caysahuana Melendez) Recuperado el Febrero de 2018, de <http://tecnologia17118.blogspot.com.co/p/curado-del-concreto.html>
- Construcción, D. d. (2018). *www.parro.com.ar*. Recuperado el Febrero de 2018, de <http://www.parro.com.ar/definicion-de-curado>
- INVIAS, I. N. (2008). *www.unicauca.edu.co*. Recuperado el 2017, de ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-152-07.pdf
- INVIAS, I. N. (15 de Agosto de 2014). *www.invias.gov.co*. Recuperado el 2017, de <ftp://ftp.ani.gov.co/Licitaci%C3%B3n%20VJVGCLP%20001-2016-M-1/Normas%20de%20Ensayo%20de%20materiales%20para%20carreteras/SECCI%C3%93N%20100.pdf>
- INVIAS, I. N. (29 de Septiembre de 2017). *www.invias.gov.co*. Recuperado el Febrero de 2018, de <http://giv.com.co/invias2013/350%20SUELO%20-%20CEMENTO.pdf>
- INVIAS, I. N. (29 de Septiembre de 2017). *www.invias.gov.co*. Recuperado el Febrero de 2017, de <http://www.giv.com.co/invias2013/422%20RIEGO%20DE%20CURADO.pdf>

Ministerio de Ambiente, V. y. (Julio de 2004). *www.siame.gov.co*. Recuperado el Febrero de 2018, de http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf

PlasticEurope. (27 de Marzo de 2016). *www.plasticseurope.org*. Recuperado el 12 de Abril de 2017, de <http://www.plasticseurope.es/centro-de-conocimiento/sala-de-prensa/comunicados-de-prensa-2016/dusseldorf-20-de-octubre-de-2016-la-industria-europea-de-los-plasticos-se-mantiene-estable-como-consecuencia-de-su-recuperacion.aspx>

PlasticsEurope. (s.f.). *www.plasticseurope.org*. Recuperado el 10 de Febrero de 2018, de <https://www.plasticseurope.org/es/about-plastics/what-are-plastics>

Química, R. B. (2015). Producción de poliolefinas en Bolivia; una investigación de mercados, tecnologías y procesos catalíticos involucrados (revisión). *Revista Boliviana de Química*, 32(5).

S.A.S, E. I. (19 de Agosto de 2016). *www.equindustriales.com*. Recuperado el 15 de Enero de 2018, de <https://www.equindustriales.com/app/download/13270845096/Estabilizacion+de+suelos.pdf?t=1471648857>

T., J. F. (10 de Enero de 2016). Colombia entirra millones de pesos por no reciclar. *El Colombiano*.

Villalaz, C. C. (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. México : Limusa Noriega Editores .

Apéndices

Apéndice A. De los materiales plásticos

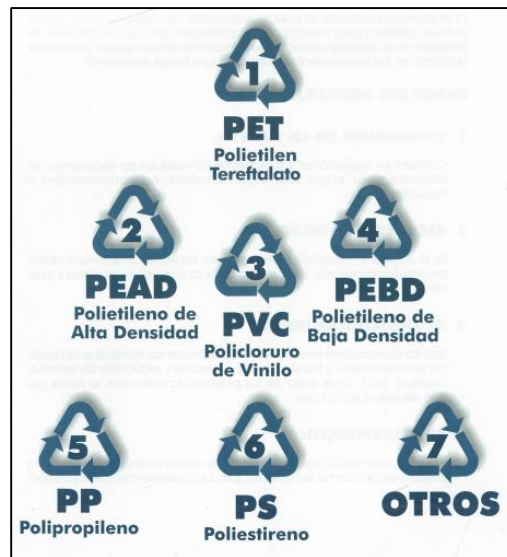
1.1. Definición de Materiales Plásticos

- Los plásticos son materiales orgánicos, igual que la madera, el papel o la lana. Las materias primas que se utilizan para producir plástico son productos naturales como la celulosa, el carbón, el gas natural, la sal y, por supuesto, el petróleo. Se han convertido en el material moderno preferido porque permite equilibrar las necesidades de hoy en día con la protección del medio ambiente. El término «plástico» proviene del griego «plastikos» que significa que se puede moldear. Se refiere a la maleabilidad, o plasticidad, del material durante la fabricación, lo que permite fundirlo, prensarlo o extrusionarlo para obtener diferentes formas, como láminas, fibras, placas, tubos, botellas, cajas, etcétera (PlasticsEurope, s.f.).
- Los plásticos hacen parte de un grupo de compuestos orgánicos denominados polímeros. Están conformados por largas cadenas macromoleculares que contienen en su estructura carbono e hidrógeno. Principalmente, se obtienen mediante reacciones químicas entre diferentes materias primas de origen sintético o natural. Dependiendo de la estructura que forma el carbono al asociarse con hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, cambian las propiedades físicas y su estructura molecular. Se dividen en termoplásticos, materiales que se ablandan al ser calentados y se endurecen al enfriarse, y termoestables, que adoptan una forma permanente al aplicarles calor y presión (Ministerio de Ambiente, 2004).

- Los plásticos son sustancias orgánicas macromoleculares obtenidas mediante procesos químicos o transformación de productos naturales. Como las macromoléculas, y por tanto los plásticos, están formadas por componentes estructurales sencillos llamados monómeros, en general reciben también el nombre de polímeros. Se obtiene principalmente del petróleo y del gas natural pero, además, podrían producirse del carbón y de materiales vegetales ((Acoplásticos)).

1.2. Clasificación de materiales plásticos

Los plásticos abarcan una gran familia de materiales que se pueden clasificar en diferentes resinas que se logran identificar de la siguiente manera ((Acoplásticos)):



Anexo 1. Identificación resinas plásticas.

1.3. Descripción de Materiales Plásticos (Resinas)

- Polietileno Tereftalato (PET): Está constituido de petróleo crudo, gas y aire. Un kilo de PET es 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire. A partir del petróleo crudo se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para obtener ácido tereftálico. El etileno, que se obtiene principalmente a partir de derivados del gas natural, es oxidado con aire para formar el etilenglicol. La combinación del ácido tereftálico y el etilenglicol produce como resultado el PET (Ministerio de Ambiente, 2004).
- Polietileno (PEAD - PEBD): El polietileno se produce a partir del etileno derivado del petróleo o gas natural. El etileno se somete en un reactor a un proceso de polimerización. Este se realiza en presencia de un catalizador, en condiciones de presión y temperatura que posibilitan la formación de polímeros, que en el producto final tienen la forma de gránulos, denominados pellets. Dependiendo de las condiciones del proceso de fabricación existen variedades de polietileno. Las más conocidas son: el polietileno de alta densidad PEAD y el polietileno de baja densidad PEBD; de éste último se producen dos tipos: el PEBD convencional y el PEBD lineal (Ministerio de Ambiente, 2004).

1.4. Aplicaciones de Materiales Plásticos (Resinas)

- Polietileno Tereftalato (PET): Botellas de gaseosas, agua, aceite y vinos; envases farmacéuticos; tejas; películas para el empaque de alimentos; cuerdas, cintas de grabación; alfombras; fibras (Ministerio de Ambiente, 2004).

- Polietileno de alta densidad (PEAD): Tuberías; embalajes y láminas industriales; tanques, bidones, canastas o cubetas para leche, cerveza, refrescos, transporte de frutas; botellas; recubrimiento de cables; contenedores para transporte; vajillas plásticas; letrinas; cuñetes para pintura; bañeras; cerramientos; juguetes; barreras viales; conos de señalización (Ministerio de Ambiente, 2004).
- Polietileno de baja densidad (PEBD, PELBD): Películas para envolver productos, películas para uso agrícola y de invernadero; láminas adhesivas; botellas y recipientes varios; tuberías de irrigación y mangueras de conducción de agua; bolsas y sacos, tapas, juguetes; revestimientos; contenedores flexibles (Ministerio de Ambiente, 2004).

1.5.Densidad y Temperatura de Fusión de Materiales Plásticos (Resinas)

TIPO DE RESINA		Sigla	Densidad [g/cm ³]	Temperatura Fusión [°C]
POLIETILENO	Alta Densidad	PEAD	0.94-0.97	125-132
	Lineal de Baja Densidad	PELBD	0.915-0.930	100-125
	Baja Densidad	PEBD	0.915-0.930	98-115
	Tereftalato	PET	1.37-1.39	255

Anexo 2. *Densidad y Temperatura de Fusión de Tipos de Polietileno* (Química, 2015).

Apéndice B. Proceso de curado

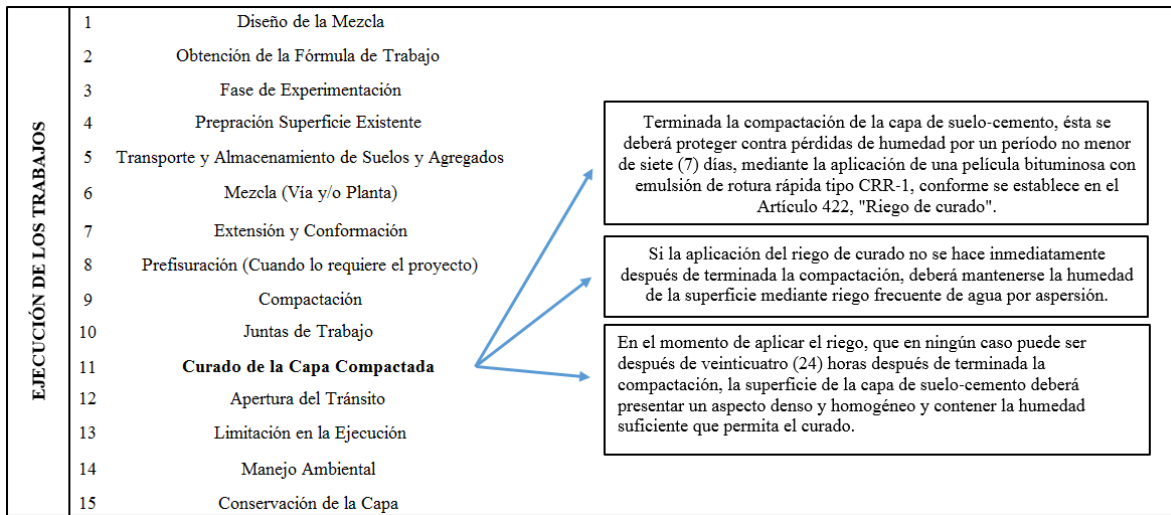
1.1. Definición de Curado – Riego de Curado

- Se entiende por curado del concreto mantener un adecuado contenido de humedad y temperatura a edades tempranas de manera que el concreto pueda desarrollar las propiedades con las cuales fue diseñada la mezcla, es importante comenzar a curar el concreto inmediatamente después del fraguado. El curado se iniciara tan pronto como el concreto haya endurecido lo suficiente como para que su superficie no resulte afectada por el procedimiento empleado (Concreto, 2015).
- Curado es mantener el hormigón o el mortero a una temperatura y humedad adecuada para asegurar su hidratación y endurecimiento adecuado (Construcción, 2018).
- Se define como riego de curado la aplicación de una película continua y uniforme de emulsión bituminosa sobre una capa tratada con un conglomerante hidráulico, al objeto de impermeabilizar toda la superficie y evitar la evaporación del agua necesaria para el correcto fraguado (Carreteras, 2014).

1.2. Mezcla Suelo- Cemento (Afirmados, Subbases y Bases, Artículo 350- 13)

El artículo 350-13 Suelo-Cemento, consiste en la construcción de una capa estructural de pavimento, constituida por una mezcla uniforme de suelos o agregados, cemento hidráulico, agua

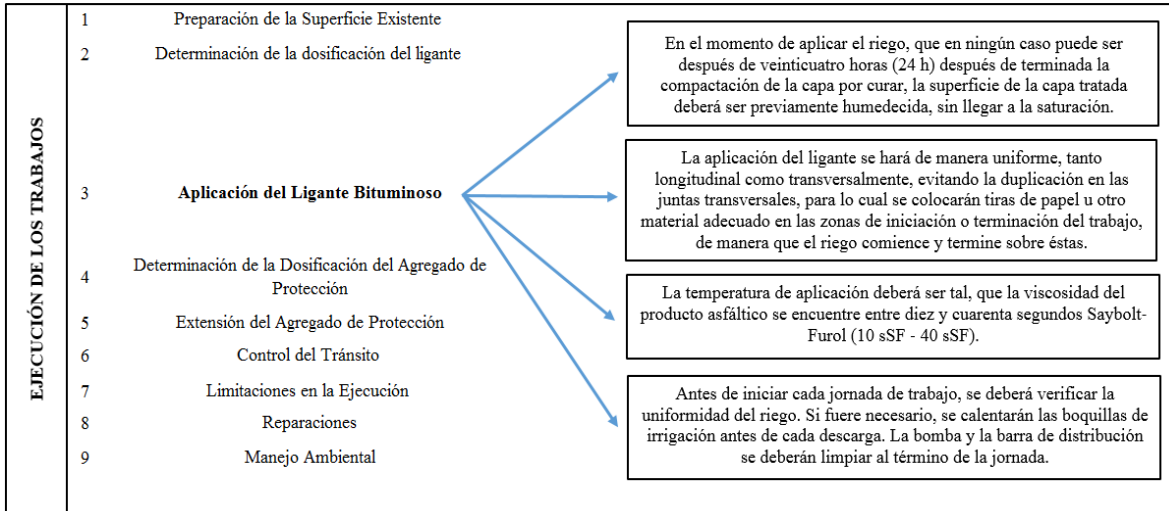
y eventualmente aditivos, de acuerdo con las dimensiones, alineamientos y secciones indicados en los documentos del proyecto o determinados por el interventor (INVIAS, www.invias.gov.co, 2017).



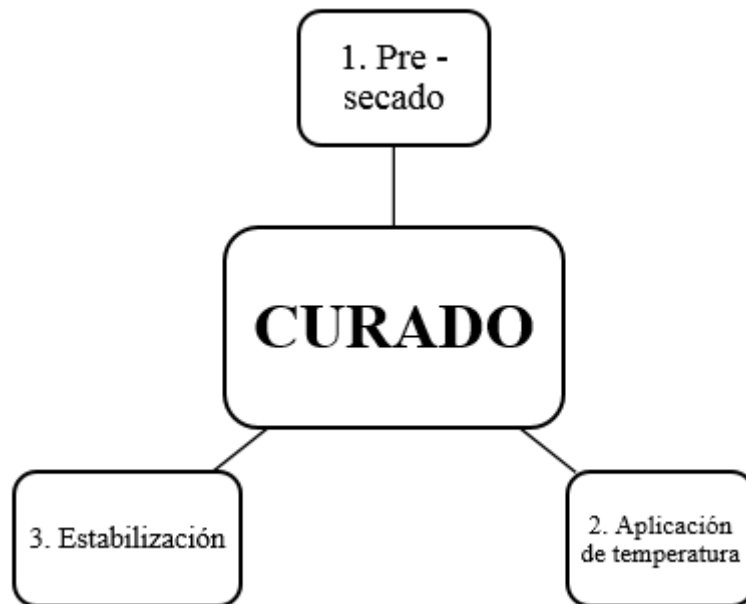
Anexo 3. Ejecución de Trabajos Artículo 350 - 13 Suelo – Cemento.

1.3.Riego de Curado (Pavimentos Asfálticos, Artículo 422 - 13)

El artículo 422 – 13 Riego de Curado consiste en el suministro, transporte, eventual calentamiento y aplicación uniforme de un ligante bituminoso sobre una capa tratada con un conglomerante hidráulico, con el fin de brindar impermeabilidad a toda su superficie, incluye también, eventualmente, el suministro y la aplicación de un agregado fino para la protección de la superficie con el riego (INVIAS, www.invias.gov.co, 2017).



Anexo 4. Ejecución de Trabajos Artículo 422 - 13 Riego de Curado.

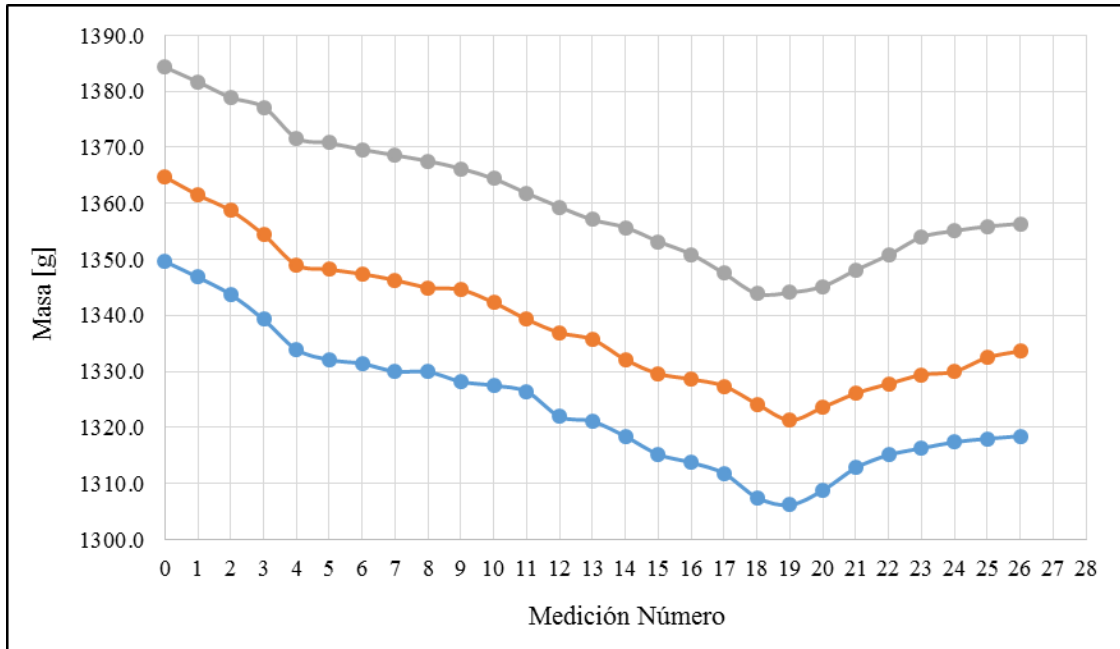
Apéndice C. Curado mezcla suelo – plástico**Anexo 5. Proceso de Curado Muestras Suelo-plástico.**

Los procedimientos de curado para la estabilización de Suelos actualmente establecidos son aplicables solo a mezclas Suelo-Cal o Suelo-Cemento debido a que estos agregados son reactivos ante la presencia de Agua. Teniendo en cuenta lo anterior, en esta investigación se elaboró un nuevo protocolo de curado para mezclas Suelo-Plástico con el fin de que los agregados plásticos funcionen como un tipo de cementante en la mezcla.

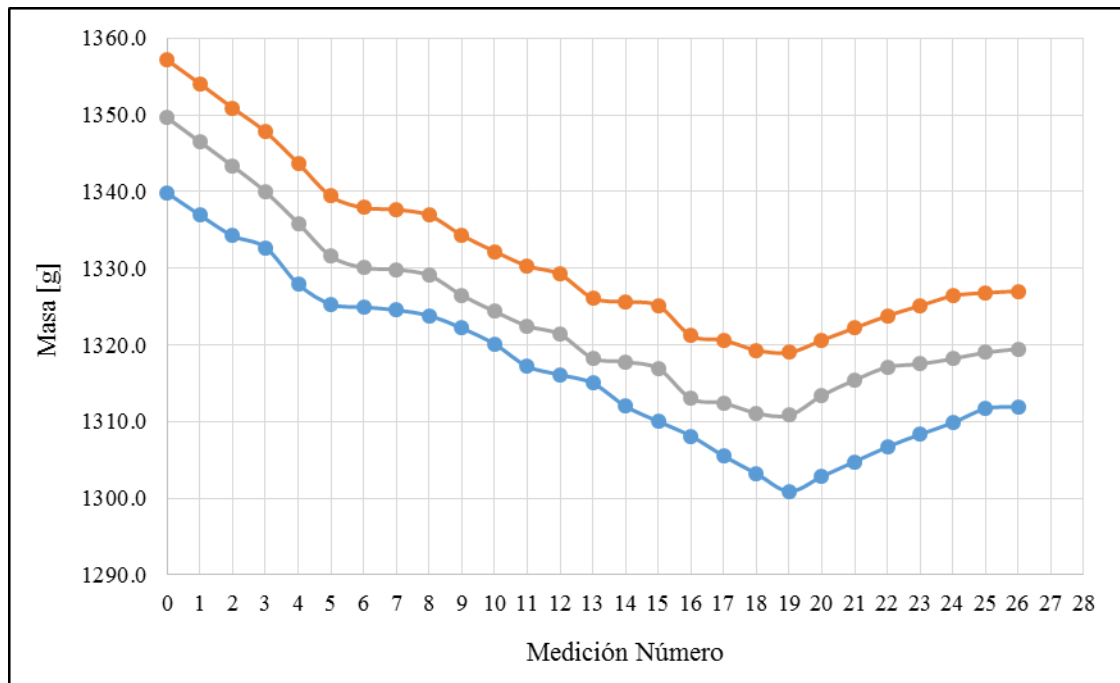
Por consiguiente, basados en las características y propiedades de los agregados plásticos, se determinó que el proceso de curado debía realizarse mediante la aplicación de temperatura; dicha temperatura fue aplicada de manera gradual según lo estipulado por el método de ensayo y error. Finalmente, el proceso de curado establecido para las condiciones de esta investigación (Mezcla Suelo - Plástico) se dividió en tres etapas:

- Etapa 1: Pre-secado. Una vez elaboradas las probetas, fueron sometidas a un secado al ambiente durante 3 días con control de su masa cada 24 horas, a fin de reducir su humedad y mejorar su consistencia.
- Etapa 2: Aplicación de Temperatura. Consistió en un secado al horno de manera gradual en un lapso de 4 horas, iniciando con una temperatura de 60 °C y realizando un incremento de la misma en 20°C cada hora, logrando que la mezcla Suelo-Plástico se comporte de manera más homogénea. Así mismo, mediante el desarrollo de la investigación se concluyó que las temperaturas a las que debía ser sometidas las probetas debían variar en el rango mencionado (60°C – 120°C), de lo contrario las probetas presentaban zonas quemadas externamente sin que la parte más interna se hubiese secado además presentaban fallas sin completar el proceso de curado ni mucho menos someterlas a ensayos de resistencia.
- Etapa 3: Estabilización. Para finalizar el proceso las probetas permanecieron en etapa de estabilización al ambiente hasta que la diferencia en su masa no se consideró significativa, se registraron datos de sus pesos cada 3 días.

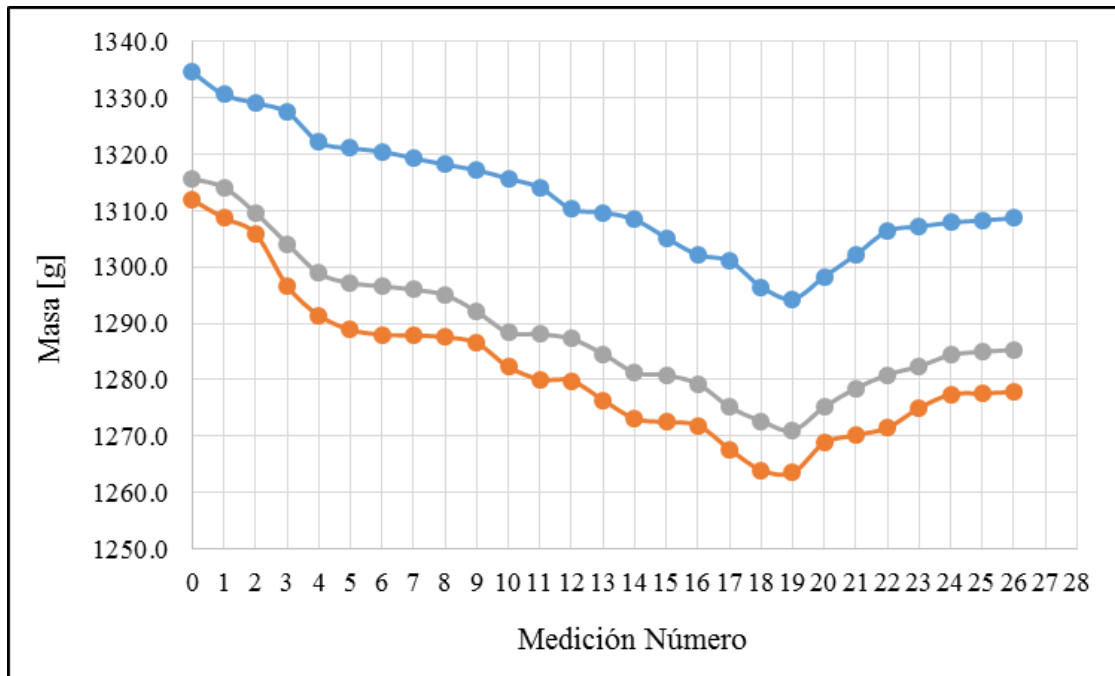
A continuación se presentan los gráficos correspondientes a la variación de Masa – Temperatura por cada tipología de probeta.



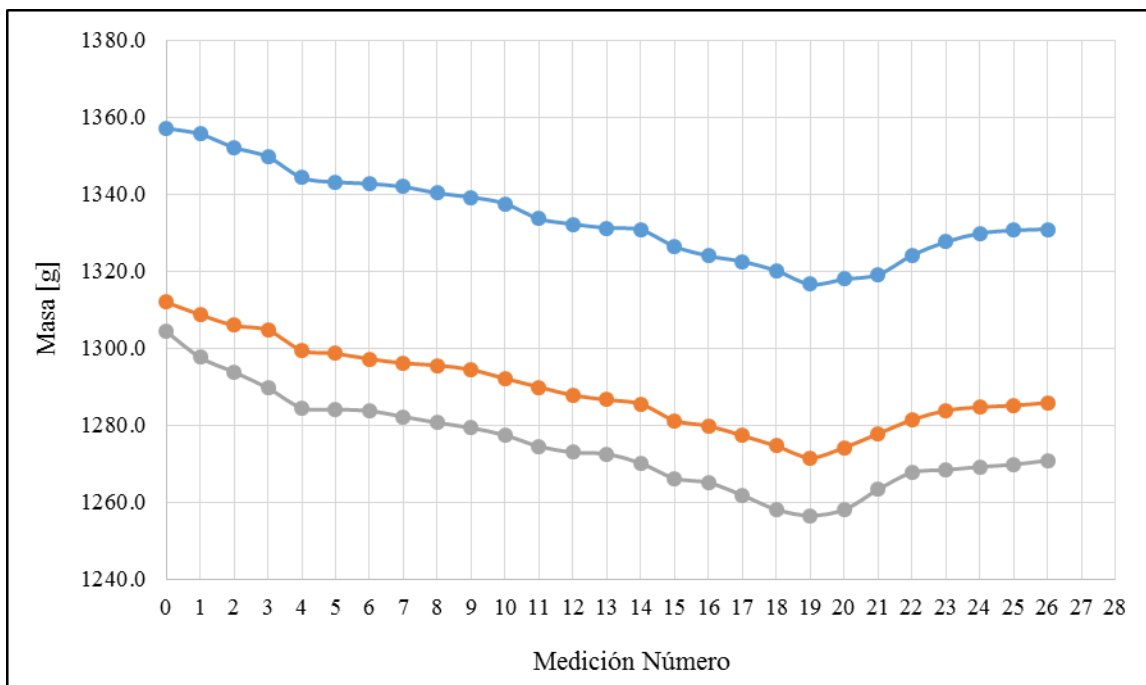
Anexo 6. Variación Masa – Temperatura Probetas al 0.5% de Plástico.



Anexo 7. Variación Masa – Temperatura Probetas al 1% de Plástico.



Anexo 7. Variación Masa – Temperatura Probetas al 1.5% de Plástico.



Anexo 8. Variación Masa – Temperatura Probetas al 2% de Plástico.