

Ciudad Obregón, Sonora, a 02 de Febrero de 2012.

Instituto Tecnológico de Sonora
P r e s e n t e.

El que suscribe Alan Ricardo Acosta Chávez, por medio del presente manifiesto bajo protesta de decir verdad, que soy autor y titular de los derechos de propiedad intelectual tanto morales como patrimoniales, sobre la obra titulada: "Efectos del cemento portland en las propiedades físicas de un suelo arcilloso de la región.", en lo sucesivo "LA OBRA", misma que constituye el trabajo de tesis que desarrolle para obtener el grado de Ingeniero Civil en ésta casa de estudios, y en tal carácter autorizo al Instituto Tecnológico de Sonora, en adelante "EL INSTITUTO", para que efectúe la divulgación, publicación, comunicación pública, distribución y reproducción, así como la digitalización de la misma, con fines académicos o propios del objeto del Instituto, es decir, sin fines de lucro, por lo que la presente autorización la extiendo de forma gratuita.

Para efectos de lo anterior, EL INSTITUTO deberá reconocer en todo momento mi autoría y otorgarme el crédito correspondiente en todas las actividades mencionadas anteriormente de LA OBRA.

De igual forma, libero de toda responsabilidad a EL INSTITUTO por cualquier demanda o reclamación que se llegase a formular por cualquier persona, física o moral, que se considere con derechos sobre los resultados derivados de la presente autorización, o por cualquier violación a los derechos de autor y propiedad intelectual que cometa el suscrito frente a terceros con motivo de la presente autorización y del contenido mismo de la obra.

ALAN ACOSTA

Alan Ricardo Acosta Chávez

(Nombre y firma del autor)



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE
SONORA**

Educar Para Trascender

**“EFECTOS DEL CEMENTO PORTLAND
EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN
SUELO ARCILLOSO DE LA REGIÓN”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

ALAN RICARDO ACOSTA CHÁVEZ

Cd. Obregón Sonora a 16 de Febrero del 2012

DEDICATORIA

El presente documento está dedicado todas las personas que me aprecian y que tuvieron fe y confianza de que lograría llegar a este punto de mi vida.

A mi familia que gracias a su afecto y palabras de aliento me convertí en la persona que ahora soy, realizado como hijo, hermano, novio y profesionalista.

A mi novia Selene que ha compartido conmigo momentos inolvidables y que me ha entregado todo su amor, confianza y apoyo en mi estadía en esta ciudad y en mi etapa de estudiante.

A mis maestros que día a día me forjaron como estudiante durante mi etapa de universitario y como profesionalista al final de la misma.

A mis amigos y compañeros quienes compartieron momentos en esta trayectoria llena de aprendizaje y conocimientos.

AGRADECIMIENTOS

Quiero empezar agradeciéndole a mi familia por todo el apoyo incondicional, el amor, la paciencia y las regañs que en todo momento de mi vida me han sabido brindar, es un regalo inmenso y un gran orgullo saberme cobijado y protegido por ella.

A mi madre Socorro que con valentía y entereza supo enfrentar las dificultades que en un momento de nuestras vidas se le presentaron y que con todo su amor y esfuerzo supo ver y tomar la mejor decisión para que yo tuviera una vida llena de valores y encaminada a que me convirtiera en un hombre responsable y de bien.

Merece de mi parte un agradecimiento especial mi padre Antonio, que supo ganarse mi amor y respeto gracias a su cariño, consejos y protección que llegaron a mi cuando más los necesitaba, sé que desde el primer momento que forme parte de su vida supo qué había ganado un hijo y yo que había encontrado un padre.

A mi hermana Yazmin que siempre he conseguido de ella una sonrisa y palabras de ánimo para que realice todos mis sueños y metas en la vida. También agradezco los momentos de diversión que juntos hemos pasado y que han hecho alegres los momentos tristes que he tenido.

Agradezco también a mi novia Selene que ha estado a mi lado tanto en los momentos buenos como en los momentos malos y que ha hecho de mí una mejor persona. Ella me ha brindado su amor incondicional y ha puesto toda su dedicación para que yo me encuentre en el lugar que estoy ahora.

Le agradezco a mis amigos y compañeros que convivieron conmigo durante esta etapa de mi vida y que también fueron pieza clave para lograr mis metas y objetivos.

Expreso mi gratitud a la ayuda, guía, consejos y sabiduría que todos mis profesores me brindaron durante mi estadía en la universidad. Al Mtro. Luis Gerardo Herrera Meléndez que se mostro siempre optimista, aportando ideas y que supo guiarme para llevar a cabo este documento. Igualmente al Mtro. Raúl Antonio Gutiérrez Durán y al Ing. Dagoberto López López por su valioso aporte para la realización del mismo.

ÍNDICE

DEDICATORIA.	i
AGRADECIMIENTOS.	ii
LISTA DE FIGURAS.	v
LISTA DE TABLAS.	vii
RESUMEN.	viii
I. INTRODUCCIÓN.	
1.1 Antecedentes.	1
1.2 Planteamiento del problema.	4
1.3 Objetivos.	4
1.4 Justificación.	5
1.5 Limitaciones del estudio.	5
II. MARCO TEÓRICO.	
2.1 Suelo-Cemento.	7
2.2 Propiedades del suelo-cemento.	9
2.3 Cemento Portland.	10
2.4 Agua.	11
2.5 Suelo.	11
2.6 Mezcla.	12
2.7 Compactación de la mezcla.	13
2.8 Curado de la mezcla.	13
III. MÉTODO.	
3.1 Muestreo del suelo.	14
3.2 Pruebas de laboratorio para la clasificación del suelo nativo.	16
3.3 Dosificación de la muestra suelo-cemento.	21
3.4 Pruebas de laboratorio para determinar las propiedades físicas del suelo nativo y del suelo-cemento	22

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	
4.1 Pruebas de laboratorio para la clasificación del suelo en estudio.	32
4.2 Pruebas de laboratorio para determinar las propiedades físicas del suelo nativo y del suelo-cemento.	33
4.3 Gráficas comparativas de las propiedades del suelo nativo y las propiedades del suelo-cemento.	35
V. CONCLUSIONES.	39
BIBLIOGRAFÍA.	42
APÉNDICE A	43
APÉNDICE B	48
APÉNDICE C	58

LISTA DE FIGURAS

- **En el cuerpo del trabajo**

III.1. Ubicación de la zona seleccionada para el muestreo del suelo.	15
III.2. Ubicación de la zona seleccionada para el muestreo del suelo.	16
III.3. Tamices para Granulometría.	18
III.4. Material fino que pasó la Malla No. 200 por lavado.	18
III.5. Equipo para la prueba de Límite Líquido.	19
III.6. Equipo para la prueba de Límite Plástico.	20
III.7. Capsula de porcelana con barritas de suelo para la prueba de Límite Plástico.	20
III.8. Frascos con suelo a distintas consistencias para realizar la prueba.	22
III.9. Suelo para la elaboración de las barritas de suelo.	22
III.10. Equipo para la prueba de Límite de Contracción Volumétrica.	23
III.11. Equipo para la prueba de Límite de Contracción Lineal.	24
III.12. Equipo para la prueba Proctor Estándar.	25
III.13. Suelo compactado dentro del molde.	25
III.14. Espécimen de suelo compactado fuera del molde.	25
III.15. Equipo para la prueba de Índice de Expansión.	26
III.16. Compactación del suelo dentro del molde.	27
III.17. Suelo compactado en el anillo y partes del equipo del molde de la prueba.	27
III.18. Equipo para la elaboración de los especímenes.	28
III.19. Adición de cemento al suelo y preparación del equipo para la prueba.	29
III.20. Colocación del suelo en el molde y compactación del mismo en su interior.	29
III.21. Máquina para la prueba de Compresión Simple.	30
III.22. Espécimen de suelo sometido a compresión simple.	31
III.23. Especímenes después de haber sido sometidos a la prueba de compresión simple.	31

IV.1. Comparación de los límites de consistencia del suelo nativo y del suelo-cemento.	35
IV.2. Comparación de los límites de contracción del suelo nativo y del suelo-cemento.	36
IV.3. Comparación de la resistencia a la compresión de los especímenes de suelo nativo y suelo-cemento, según su tiempo de curado.	36
IV.4. Comparación del peso específico seco máximo que presentaron los especímenes de suelo nativo y suelo-cemento.	37
IV.5. Comparación del contenido de agua óptimo que presentaron los especímenes de suelo nativo y suelo-cemento.	37
IV.6. Comparación del índice de expansión del suelo nativo y del suelo-cemento.	38

- **En apéndices.**

1. Grafica para la determinación del Límite Líquido.	42
2. Carta de Plasticidad para la clasificación del suelo.	43
3. Grafica para determinar el contenido de humedad optima y el peso específico seco máximo.	49
4. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 1 a los 2 días de curado.	52
5. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 2 a los 2 días de curado.	52
6. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 1 a los 7 días de curado.	53
7. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 2 a los 7 días de curado.	53
8. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 1 a los 28 días de curado.	54
9. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 2 a los 28	

días de curado.	54
10. Grafica para determinar el Límite Líquido del suelo-cemento.	57
11. Grafica para determinar el contenido de humedad optima y el peso especifico seco máximo.	60
12. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 1 a los 2 días de curado.	63
13. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 2 a los 2 días de curado.	63
14. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 1 a los 7 días de curado.	64
15. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 2 a los 7 días de curado.	64
16. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 1 a los 28 días de curado.	65
17. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 2 a los 28 días de curado.	65

LISTA DE TABLAS

- **En el cuerpo del trabajo.**

II.1. Tipos de cementos Portland.	10
III.1. Clasificación de suelos según AASHTO.	17
III.2 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS; símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos.	17
III.3. Cantidad de cemento para varios suelos (FUERZA AÉREA E.U.A).	21
III.4. Potencial de expansión según su Índice de expansión.	26

- **En apéndices.**

1. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS; símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos.	43
2. Clasificación de suelos según AASHTO.	44

RESUMEN

El presente trabajo consistió en determinar los efectos del cemento Portland en las propiedades físicas de un suelo arcilloso de la región del sur del estado de Sonora, específicamente en un suelo extraído de las zonas de cultivos agrícolas del sur de Ciudad Obregón.

En este documento, se hace mención del uso de la estabilización de suelos con cemento Portland (suelo-cemento), su aprovechamiento y utilización en México así como también en la región sur del estado de Sonora.

Mediante pruebas de laboratorio que más adelante se describirán y con ayuda de los métodos de clasificación de suelos más usados (método SUCS Y AASHTO), se clasificó dicho suelo extraído, el cual es un suelo arcilloso (CH) inorgánico de alta plasticidad.

Se determinó el porcentaje requerido para llevar a cabo la estabilización del suelo en estudio mediante el método de la Fuerza Aérea de E.U.A y este fue de 12 % en peso. A este se le hicieron diversas pruebas para determinar sus propiedades físicas antes y después de su estabilización, esto con el objetivo de averiguar los cambios tanto positivos como negativos que se llegasen a presentar.

Se elaboraron 12 especímenes de suelo nativo y de suelo estabilizado (2 con 2 días de curado, 2 con 7 días de curado y 2 con 28 días de curado), los cuales fueron sometidos a la prueba de compresión simple donde se pudo obtener la carga actuante en el momento de falla y su deformación unitaria, siendo los especímenes elaborados con suelo-cemento los que presentaron una mayor resistencia a la compresión simple en relación a los elaborados con suelo nativo y los elaborados con suelo nativo presentaron una mayor capacidad de deformación en relación a los elaborados con suelo-cemento.

Los límites de consistencia del suelo-cemento en relación con los del suelo nativo presentaron modificaciones, siendo estos menores en el suelo-cemento. El límite

líquido se redujo en un 14.81 %, el límite plástico se redujo en un 19.23 % y el índice de plasticidad se redujo en un 10.71 %.

El peso específico seco máximo aumentó en un 1.54 % y el contenido de agua óptimo aumentó en un 9.70 % en el suelo-cemento en relación con el suelo nativo. El índice de expansión se redujo en un 95.26 % en el suelo-cemento en relación con el suelo nativo.

La adición de cemento Portland a un suelo arcilloso es benéfico y propicia a que este tipo de suelo problemático sea una opción viable para ser usado en la construcción de diversas edificaciones ya que este le proporciona al suelo una mayor resistencia así como también la disminución de sus límites de consistencia y su potencial de expansión.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes.

En general, se considera que la aplicación del suelo cemento empezó a estudiarse en forma metódica y científica en la decena de 1910 a 1920, sin embargo, existen muchos antecedentes en la literatura que muestran que su utilización en pisos y muros comenzó desde mucho antes. Puede asegurarse que el arte de su aplicación se inició con el uso del cemento, cuando el constructor común encontró en la mezcla de cemento y suelo un excelente material de construcción. Parece ser que la utilización del suelo-cemento en forma científica, esto es con metodología y técnicas apropiadas, se originó casi simultáneamente e independientemente en los E.U.A. e Inglaterra.

El tratamiento del suelo con cemento ha sido considerado en las notas históricas de la ingeniería como una aportación importante al desarrollo tecnológico, principalmente porque permite ampliar de manera considerable la utilización de casi todos los suelos como materiales de construcción.

El desarrollo tecnológico alcanzado por las sociedades modernas en las últimas décadas ha brindado la posibilidad de producir continuamente toda una serie de nuevos materiales que les permiten satisfacer sus incesantes requerimientos de construcción. Uno de esos materiales que ha logrado tener un amplio uso a partir de la década de los cuarenta es el producto endurecido de la mezcla compactada de suelo con cemento y agua, llamado suelo-cemento, cuyas bondades ingenieriles se han demostrado en la construcción de pequeñas y grandes obras en todo el mundo.

Casi todos los tipos de suelo que encontramos pueden estabilizarse con cemento con excepción de los que contienen altos porcentajes de materia orgánica. Por otra parte, los suelos de arcilla o limo requerirán un mayor porcentaje de cemento para lograr los resultados esperados.

La técnica de estabilización involucra una buena disgregación del suelo (especialmente en el caso de las arcillas), adición del cemento, mezclado en seco y adición del agua tanto de fraguado como la necesaria para la compactación. (Fernández Loaiza, 1982).

El suelo-cemento es un material producto de una mezcla apropiada de suelo, cemento y agua, que se compacta y construye con determinadas técnicas y tiene un campo de aplicación muy amplio; es relativamente fácil de usar y los materiales que lo componen son económicos y muy abundantes. (De la Fuente Lavalle, 1995).

Comúnmente se piensa que la mejoría en las propiedades ingenieriles en un suelo tratado con cemento, se debe principalmente al endurecimiento del cemento Portland, pero a la fecha se sigue discutiendo acerca de los procesos que tienen lugar durante la hidratación del cemento en presencia de arcillas. Al agregarse cemento a un suelo arcilloso este, además de aumentar su resistencia, se vuelve

menos plástico y menos expansivo al quedar en contacto con la humedad. (Fernández Loaiza, 1982).

El suelo-cemento se usa principalmente en la construcción de:

- Bases de pavimentos (carreteras, calles, aeropuertos y estacionamientos).
- Ampliaciones, acotamientos y taludes de carreteras.
- Estabilización de taludes.
- Muros.
- Proyectos hidroeléctricos y de recursos hidráulicos (por ejemplo: construcción de terraplenes y cimentación de presas, construcción de presas de almacenamiento, construcción de cortinas de presas, construcción de canaletas para riego y revestimiento de canales).
- Construcción de cimentaciones.
- Impermeabilización de almacenamientos para agua.
- Construcción de balastos y subbalastos para ferrocarriles.
- Protección contra la erosión de márgenes producida por corrientes fluviales.

Como se observa su uso permite una gran flexibilidad y principalmente se ha aprovechado suelo-cemento para la construcción de bases de carreteras, muros, aeropuertos, áreas de almacenamiento, protecciones de presas y protecciones contra la erosión de corrientes de agua.

Existen dos formas o métodos para estabilizar con cemento Pórtland, una es la llamada estabilización del tipo flexible, en el cual el porcentaje de cemento varía del 1 al 4%, con esto sólo se logra disminuir la plasticidad y el incremento en la resistencia resulta muy bajo.

Otra forma de mejorar el suelo con cemento, se conoce como estabilización rígida, en ella el porcentaje de cemento varía del 6 al 14%, este tipo de mejoramiento es muy común en las bases, ya que resulta muy importante que éstas y la carpeta presenten un módulo de elasticidad semejante, ya que con ello se evita una probable fractura de la carpeta, ya que ambos trabajan en conjunto; para conocer el

porcentaje óptimo a emplear se efectúan pruebas de laboratorio con diferentes contenidos de cemento.

Es por esto que la estabilización de un suelo arcilloso mediante la adición de cemento Portland es de vital importancia para que el mismo pueda ser apto para construir en el, ya que mediante este proceso se mejoran sus características tanto físicas como mecánicas.

1.2 Planteamiento del problema.

Al mezclar un suelo con cemento, se produce un nuevo material, duro, con mejores características que el usado como agregado. Esta estabilización no es tan sensible a la humedad y al mismo tiempo produce que la plasticidad de suelos arcillosos disminuya.

Un suelo arcilloso, por sus características tanto físicas como mecánicas, genera dificultades al ser empleado en diversas construcciones, pero en ocasiones es necesaria su aplicación y uso. Es por ello que se ha optado por usar métodos de estabilización, con el fin de modificar y mejorar las propiedades de los suelos problemáticos como el suelo arcilloso.

El problema a resolver consiste en determinar los efectos del cemento Portland en las propiedades físicas de un suelo arcilloso de la región, específicamente en los límites de plasticidad, índice de expansión, compactación y resistencia a la compresión, con el fin de observar en que magnitud se logran mejorar estas propiedades.

1.3 Objetivos.

- Objetivo general.

Determinar los efectos del cemento Portland en las propiedades físicas de un suelo arcilloso de la región, específicamente en los límites de plasticidad, índice de expansión, compactación y resistencia a la compresión.

- Objetivos específicos.

- a) Muestrear un suelo arcilloso típico de la región.
- b) Clasificar el suelo arcilloso mediante el método SUCS y AASHTO
- c) Investigar la cantidad adecuada de cemento portland a incorporar al suelo.
- d) Determinar las propiedades físicas mediante pruebas de laboratorio al suelo arcilloso nativo y estabilizado con cemento Portland.
- e) Analizar los resultados obtenidos, para verificar la mejora de sus propiedades.

1.4 Justificación.

La realización de esta investigación reviste importancia ya que permitirá conocer los efectos que produce la estabilización mediante cemento Portland en las propiedades físicas de un suelo arcilloso, ya que en la mayor parte del sur de Sonora predomina este tipo de suelo.

En México y más aún en la región sur del estado de Sonora, el suelo-cemento ha sido muy poco utilizado, esto en gran medida por la falta de información de los beneficios que este produce, así esta investigación vendrá a fomentar el uso del suelo-cemento en diversas construcciones viables para su aplicación.

Por lo tanto esta investigación beneficiará a los organismos tanto públicos como privados dedicados al diseño, construcción, planeación e investigación de obras civiles del estado de Sonora, así como también a los docentes del Instituto Tecnológico de Sonora, encargados de impartir las asignaturas del plan de estudios de Ingeniería Civil.

1.5 Limitaciones del estudio.

El presente documento muestra los efectos del cemento Portland en las propiedades físicas de un suelo arcilloso de la región y para llevarlo a cabo fue necesario aplicar métodos tanto de clasificación, dosificación y experimentación.

La utilización de estos métodos puede representar limitaciones a la hora de ponerlos en práctica debido a diversos efectos tanto naturales como materiales que se encontraron presentes en el momento de su aplicación.

Entre los efectos naturales se encuentran la humedad y el clima que predominaron en la ciudad en los días que se realizaron las pruebas de laboratorio necesarias para llevar a cabo el método establecido.

También resulta importante señalar que todas las pruebas de laboratorio se realizaron en el laboratorio de Ingeniería Civil del Instituto Tecnológico de Sonora, utilizando únicamente los recursos materiales y los equipos para la realización de las pruebas con los que este cuenta.

Para la dosificación del cemento que se agregó a las muestras de suelo, se utilizó el método empleado por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, estableciendo como parámetro un solo porcentaje olvidándose con esto el factor económico a la hora de llevar a cabo la estabilización del suelo.

II. MARCO TEÓRICO

Debido a su gran heterogeneidad y variabilidad intrínseca, el suelo presenta problemas muy serios que ordinariamente no se encuentran en otros materiales de construcción. (Fernández Loiza, 1982).

Los ingenieros de suelos han considerado durante muchos años al empleo del cemento Portland como uno de los materiales más indicados en la estabilización de suelos. (Fernández Loiza, 1982).

2.1 Suelo-Cemento.

La Portland Cement Association propone la definición siguiente: “El suelo-cemento es una mezcla íntima de suelo, convenientemente pulverizado, con determinadas porciones de agua y cemento que se compacta y cura para obtener mayor densidad.

Cuando el cemento se hidrata la mezcla se transforma en un material duro, durable y rígido". (De la Fuente Lavalle, 1995).

o Ventajas.

- Al tratar los suelos mediante cemento, se mejoran sus características físicas para que así puedan satisfacer los requerimientos de diseño de cualquier proyecto.
- Presenta una prolongada durabilidad bajo condiciones adversas y en los climas más difíciles.
- En casos de urgencias constructivas, su aplicación permite reducir considerablemente los tiempos de construcción normales si se utilizan las técnicas y maquinarias apropiadas.
- Sus propiedades de resistencia aumentan con el tiempo, lo que favorece que su conservación sea mínima y tenga una prolongada vida útil.

o Desventajas.

- El aumento del costo por la adición del cemento y actividades constructivas.
- Una vez que se ha introducido el cemento en el suelo y se hace el humedecido, la colocación y compactación de las capas deben hacerse con gran rapidez para evitar el fraguado anticipado y tener resultados pésimos.
- La liga entre diferentes capas es dificultosa.
- Produce mayor agrietamiento en los pavimentos.
- Se deben aplicar técnicas en general poco conocidas en México, si bien no difíciles de adquirir y ya bastante probadas en otros países.

2.2 Propiedades del suelo-cemento.

- Relación esfuerzo deformación.

Los suelos predominantemente granulares dan después de tratados materiales frágiles. Los suelos cohesivos tratados presentan un comportamiento elástico lineal y elástico no lineal significativo. (De la Fuente Lavalle, 1995).

- Resistencia a la compresión simple.

Esta varía principalmente con:

- El contenido y tipo de cemento usado.
- La eficiencia lograda en el mezclado del cemento con el suelo.
- La cantidad y calidad del agua usada.
- El tiempo transcurrido después de realizados la humectación, mezclado y compactado de los materiales.
- El grado de compactación alcanzado.
- La duración y forma de hacer el curado.
- En mayor medida el tipo de suelo usado.

- Resistencia a la absorción del agua y al hinchamiento.

Esta resistencia dependerá de la cantidad de finos y de qué tipo son, así como del contenido de cemento. Aunque en general tendrá suficiente resistencia, es conveniente evitar que el agua lo penetre, sobre todo aquellos especímenes construidos con apreciables contenidos de finos plásticos. Los suelos expansivos dan capas comparativamente blandas después de tratados y colocados.

2.3 Cemento Portland.

El cemento Portland es un material finamente pulverizado, generalmente de color gris a café grisáceo, compuesto principalmente por minerales cristalinos artificiales, siendo los más importantes los silicatos de calcio y aluminio.

Estos minerales al reaccionar con el agua producen compuestos capaces de impartir propiedades semejantes a las de las rocas una vez que ha endurecido la mezcla de cemento y agua. (Fernández Loaiza, 1982).

Las partículas de un cemento se encuentran comprendidas entre 1 micra y 80 micras pasando la mayor parte por la malla No. 200 (74 micras).

La velocidad de endurecimiento y otras propiedades dependen en forma considerable de los compuestos esenciales del cemento y de la finura del mismo.

Tabla II.1. Tipos de cementos Portland.

TIPOS DE CEMENTOS PORTLAND		
DESCRIPCIÓN GENERAL	TIPO	USO
Normal	I	Para concretos en donde no se requieren propiedades especiales.
Normal con inductor de aire	IA	Para soportar mejor la acción de las heladas.
Modificado	II	Resistencia moderada a los sulfatos. Calor de hidratación menor que en cemento normal.
Modificado, con inductor de aire	IIA	Ataque severo de las heladas y moderado de los sulfatos.
Alta resistencia rápida	III	Para rápido endurecimiento.
Alta resistencia rápida, con inductor de aire	IIIA	Ataque severo de las heladas y rápido endurecimiento.
Bajo calor de hidratación	IV	Cuando se requiera que el calor de hidratación sea mínimo.
Resistente a los sulfatos	V	Cuando se requiera una alta resistencia al ataque de los sulfatos.

2.4 Agua.

El agua tiene como funciones principales:

- Hidratar el cemento para producir la aglutinación de las partículas sólidas.
- Producir la lubricación entre las partículas para facilitar la compactación.

La cantidad de agua varía comúnmente entre el 10 y 20 % del peso seco de la mezcla en suelos plásticos y menores del 10 % en los granulares.

Se recomienda que el agua que se utilice esté relativamente limpia y libre de cantidades apreciables de ácidos, álcalis y materia orgánica que puedan afectar al cemento.

El contenido de agua se determina tomando en cuenta la trabajabilidad, manejabilidad de la mezcla, la necesidad de evitar los agrietamientos excesivos y para alcanzar la compactación más adecuada con el equipo disponible.

2.5 Suelo.

En un suelo arcilloso, las partículas tienen un tamaño del orden de 2 micras o menores y presentan una gran actividad eléctrica. Engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano. (Fernández Loaiza, 1982).

Algunas propiedades de las arcillas son:

- Capacidad de absorción
- Hidratación e Hinchamiento
- Plasticidad
- Tixotropia

Los minerales cristalinos cuya actividad superficial es tal que se presenta cohesión y plasticidad, podemos definirlos como arcillosos. Se conocen aproximadamente 15 minerales principales de este tipo, pero podría decirse que en general se tienen 3

grupos dominantes, a saber: caolinita, montmorillonita e illita. (Fernández Loaiza, 1982).

Algunas arcillas absorben hasta 30 veces su volumen en agua, y otras pueden absorber tanto como 300 veces el mismo. Cuando estas arcillas absorben agua, se expanden y retienen la misma.

Al mismo tiempo que se agota el agua del suelo, las partículas de arcilla se encogen, creando huecos que son llenados con aire. Estos huecos aparecen como rajaduras en el suelo, y pueden ser desde microscópicos hasta varios pies de largo y varias pulgadas de profundidad.

Un suelo arcilloso saturado es difícil de compactar pues las presiones de poro no se disipan rápidamente, se tiene baja trabajabilidad y condiciones de transitabilidad pobres. Si el suelo arcilloso no está saturado presenta problemas para la homogenización de la humedad óptima y además tienden a secarse en forma no uniforme.

Todas estas características presentes en un suelo arcilloso, producen problemas en las construcciones que se encuentran en su superficie, afectándolas permanentemente de diversas formas: provocan hinchamientos (reventaduras y levantamientos), se pierde la capacidad de soporte y se comprimen con facilidad con el aumento de la humedad.

2.6 Mezcla.

Las reacciones de la pasta de agua-cemento con el suelo son de naturaleza físico-químico. La reacción química producida es función de las características de los agentes químicos que existen en la mezcla, de sus concentraciones, tiempo, tipo de agua, tipo de cemento, curado y de los aditivos usados. (De la Fuente Lavalle, 1995).

La reacción del cemento con la arcilla no se puede considerar como la reacción de un cementante con un material inerte. La arcilla reacciona y cambia durante el proceso. Así se ha encontrado que la mezcla con cemento altera la estructura interna de los minerales arcillosos.

Según A. Herzog y J.K. Mitchell ocurren dos reacciones principales:

1. La hidrólisis e hidratación del cemento dan una primera reacción, incrementando el pH y liberando calcio.
2. Debido al alto valor de pH y al calcio liberado se puede iniciar el ataque químico de las partículas de arcilla y causar el rompimiento de los silicatos y aluminas amorfas; que se combinarán con el calcio para dar la segunda reacción cementante.

2.7 Compactación de la mezcla.

La compactación de la mezcla tiene efecto considerable en las propiedades ingenieriles del producto terminado. La compactación aumenta en forma considerable la resistencia a la compresión simple y la durabilidad. También es benéfica porque disminuye significativamente la permeabilidad y la tendencia al agrietamiento.

El suelo-cemento debe considerarse como un producto que cambiara con el tiempo. Al principio, cuando los cambios son muy vigorosos, el procedimiento de construcción ejercerá una decisiva influencia. Por tal motivo, el retardo en la compactación puede hacer ineficiente el tratamiento, ya que destruirá y afectará los vínculos establecidos inicialmente entre las partículas. (De la Fuente Lavalle, 1995).

El contenido de humedad óptimo con el que se alcanza el peso volumétrico seco máximo, en una prueba de compactación, no necesariamente proporciona la durabilidad y resistencia máxima.

2.8 Curado de la mezcla.

Al igual que en los concretos ordinarios, realizar un buen curado de la mezcla es necesario para alcanzar mejores resistencias. Aunque por otra parte, un curado prolongado en exceso aumentara el agrietamiento. (De la Fuente Lavalle, 1995).

La temperatura durante el curado de las mezclas influye en la resistencia, siendo mayor la que se alcanzara a más elevada temperatura hasta cierto límite.

III. MÉTODO

Para cumplir con los objetivos propuestos anteriormente, fue necesario determinar un método a seguir, con el fin de realizar todas las pruebas pertinentes con un orden coherente y acertado.

3.1 Muestreo del suelo.

Para determinar las propiedades de un suelo en el laboratorio, fue preciso contar con muestras representativas de dicho suelo. Un muestreo adecuado y representativo es de primordial importancia, pues tiene el mismo valor que el de los ensayos en sí.

La muestra de suelo que se obtuvo del terreno natural, fue una muestra alterada de manera individual de un sondeo a cielo abierto y se siguió el siguiente procedimiento:

- Se rebajó la parte seca y suelta del suelo a una profundidad no menor de 30 cm con el propósito de obtener una muestra fresca y libre de impurezas.
- Se tomó una muestra suficiente del suelo y se colocó en un recipiente previamente identificado
- La muestra se envió al laboratorio.

El lugar seleccionado para el muestreo se ubica por la calle Michoacán al sur de Ciudad Obregón Sonora, a espaldas de las colonias Profa. Esperanza Tiznado y Cuauhtémoc Cárdenas. Ver figura III.1 y III.2.

El suelo en la zona está dedicado a la siembra de algodón y otros productos agrícolas.

Puesto que se requería de un suelo arcilloso, se recurrió a esta zona de la ciudad, ya que en ella se desarrolla la agricultura y por ende este tipo de suelo es propicio para la misma y es ahí donde fue posible encontrarlo.

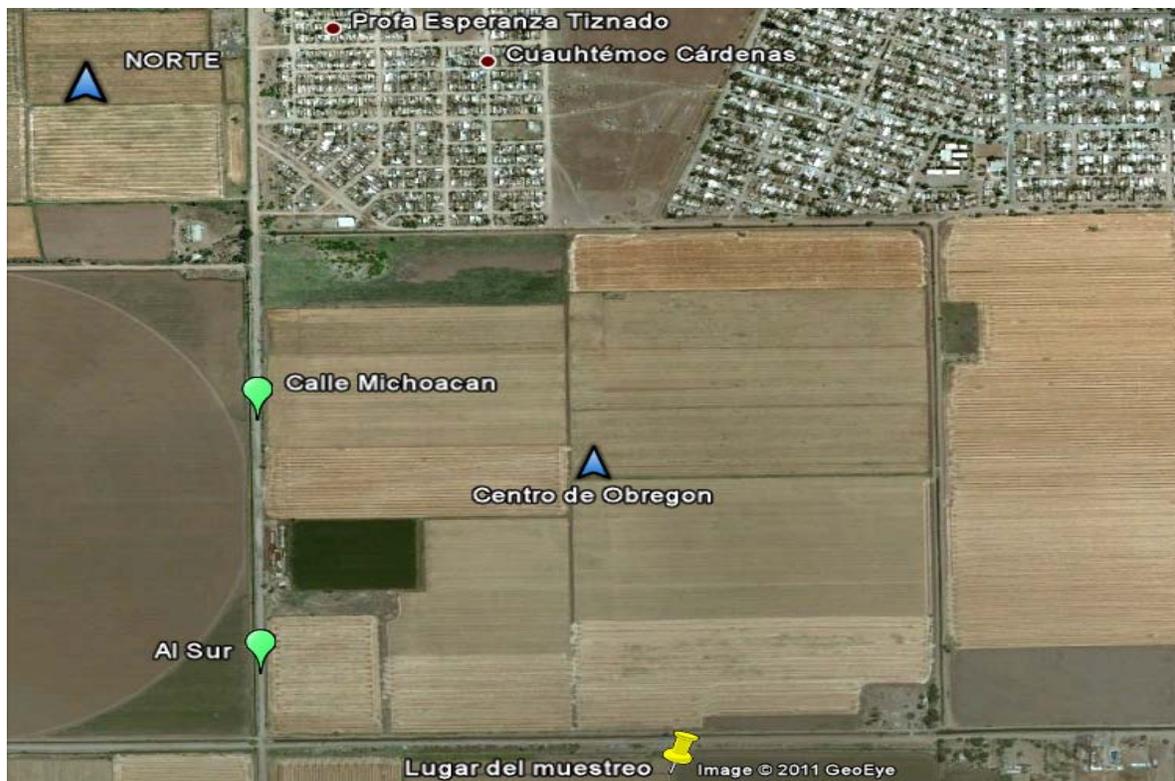


Figura III.1. Ubicación de la zona seleccionada para el muestreo del suelo.

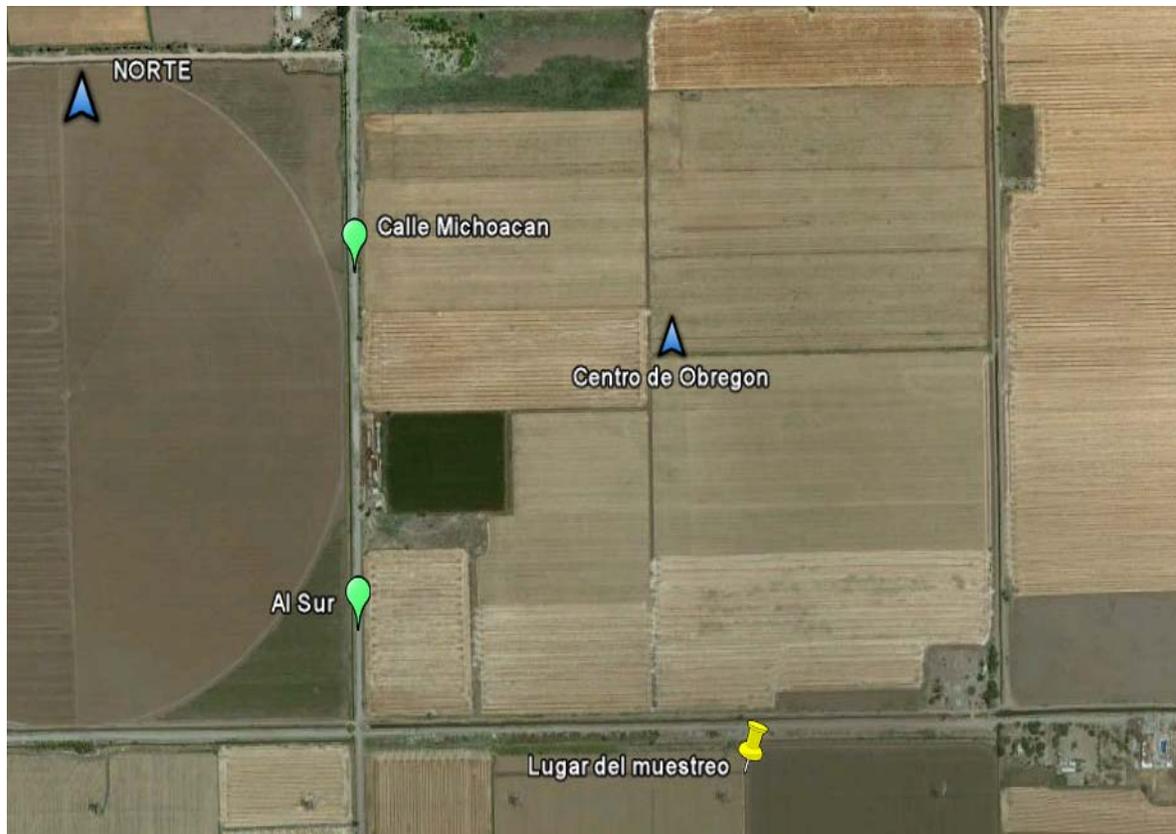


Figura III.2. Ubicación de la zona seleccionada para el muestreo del suelo.

3.2 Pruebas de laboratorio para la clasificación del suelo nativo.

La clasificación de suelos es una categorización sistemática de los mismos basado en características distintivas y en criterios de uso.

Un método de clasificación de suelos es el AASTHO, que es la denominación del sistema de clasificación de suelos determinado y confeccionado por el Departamento de Caminos Públicos de U.S.A. Ver Tabla III.1.

Entre los diversos estudios tendientes a encontrar un sistema de clasificación que satisfaga los distintos campos de aplicación, destacan los efectuados por el doctor A. Casagrande, los cuales cristalizaron en el conocido Sistema de Clasificación de Aeropuertos, así originalmente llamado, que después se convertiría en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2001). Ver Tabla III.2.

Este sistema reconoce que las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos constituidos por partículas menores que la malla No. 200, pueden deducirse cualitativamente a partir de sus características de plasticidad. (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2001).

Tabla III.1. Clasificación de suelos según AASHTO.

TABLA N° 1 : Clasificación de Suelos según AASHTO

CLASIFICACION GENERAL	Materiales Granulares (igual o menor del 35% pasa el tamiz N° 200)							Materiales Limo - Arcillosos (más del 35% que pasa el tamiz N° 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
GRUPOS	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
SUB - GRUPOS	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7-6
% que pasa el Tamiz:											
N° 10	50 máx.										
N° 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.								
N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características del Material que pasa el tamiz N° 40											
Límite Líquido			NO PLÁSTICO	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 máx.
Índice de Plasticidad	6máx	6 máx.		10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Tipos de Material	fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Grava, arenas limosas y arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
Terreno de Fundación	Excelente a Bueno						Regular a Deficiente				

NOTA: El índice de plasticidad de los suelos A-7-5 es igual o menor que su Límite Líquido 30, el de los A-7-6 mayor que su Límite Líquido (fig. 1) se halla indicada la relación entre lo LL e IP de los materiales finos. Dicho de otro modo, el grupo A-7 es subdividido en A-7-5 ó A-7-6 dependiendo del Límite Plástico (L.P.)
 Si el LP \geq 30, la clasificación es A-7-6
 Si el LP < 30, la clasificación es A-7-5

Tabla III.2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS; símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos.

Símbolo de grupo	Criterios
CL	Inorgánico; $LL < 50$; $PI > 7$; se grafica sobre o arriba de la línea A
ML	Inorgánico; $LL < 50$; $PI < 4$; o se grafica debajo de la línea A
OL	Orgánico; $LL - \text{seco en horno} / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$; $LL < 50$
CH	Inorgánico; $LL \geq 50$; PI se grafica sobre o arriba de la línea A
MH	Inorgánico; $LL \geq 50$; PI se grafica debajo de la línea A
OH	Orgánico; $LL - \text{seco en horno} / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$; $LL \geq 50$
CL - ML	Inorgánico; se grafica en la zona sombreada
P_t	Turba, lodos y otros suelos altamente orgánicos

Estos dos métodos mencionados anteriormente, son los que se utilizaron para determinar el tipo de suelo seleccionado.

Las pruebas que se realizaron al suelo, para utilizar los métodos de clasificación mencionados anteriormente son las siguientes:

- Análisis Granulométrico.

Esta prueba tiene por objetivo determinar en forma cuantitativa la distribución de las partículas del suelo de acuerdo a su tamaño.

Específicamente para el estudio se paso el suelo con lavado por la malla No. 200, con el fin de determinar el porcentaje que la pasa (finos) y el porcentaje que se retiene (arena). Ver Figura III.3 y III.4.



Figura III.3. Tamices para Granulometría.



Figura III.4. Material fino que pasó la Malla No. 200 por lavado.

- Determinación del Límite Líquido (LL) por el método del “Penetrómetro de Cono”.

El método de la Copa de Casagrande ha sido superado por el método del “Penetrómetro de Cono”, el cual es un procedimiento con un resultado más satisfactorio debido a que es menos propenso a errores experimentales y personales. La metodología de esta prueba se rige con la Norma Inglesa BS1377-2:1990.

Esta prueba consistió en determinar la penetración del cono en milímetros y el contenido de humedad en muestras de suelo previamente preparadas con diferentes cantidades de agua para obtener distintas consistencias. Posteriormente se traza la curva de fluidez de los contenidos de agua, en porcentaje, en escala aritmética (eje de las ordenadas) contra las penetraciones, en milímetros, en escala logarítmica (eje de las abscisas), se traza una línea de mejor ajuste por los puntos realizados. A partir de la penetración correspondiente a los 20 mm, se traza una línea vertical hasta cortar a la línea de ajuste. Por el punto de corte se traza una línea horizontal hasta el eje de las ordenadas. La humedad correspondiente a este punto es el límite líquido. Ver Figura III.5.



Figura III.5. Equipo para la prueba de Límite Líquido.

- Determinación del Límite Plástico (LP) por el método de “La Palma de la Mano o Placa de Vidrio”.

Esta prueba tiene por objetivo determinar el contenido de humedad en porcentaje más bajo con el que pueden formarse rollitos de suelo de unos 3,2 mm (1/8") de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa (vidrio esmerilado), sin que dichos rollitos se desmoronen. Ver Figura III.6 y III.7.

La metodología de esta prueba está regida por la Norma ASTM D-4318.



Figura III.6. Equipo para la prueba de Límite Plástico.



Figura III.7. Cápsula de porcelana con rollitos de suelo para la prueba de Límite Plástico.

- Determinación del Índice de Plasticidad (IP).

Esta prueba tiene por objeto determinar el Índice de Plasticidad del suelo y este puede obtenerse mediante la diferencia entre su límite líquido y su límite plástico.

$$IP = LL - LP$$

3.3 Dosificación de la mezcla suelo-cemento.

La dosificación de las cantidades de suelo y cemento para la estabilización del mismo, plantea a la fecha un problema que para su solución requiere del estudio de las posibles reacciones y formaciones de nuevas especies minerales que tomarán lugar en el proceso de estabilización.

Para determinar la cantidad de cemento que se le agregó a las muestras de suelo seleccionado, se utilizó el método empleado por la Fuerza Aérea de Estados Unidos, el cual se presenta en la tabla siguiente.

Como el suelo en estudio resultó ser una arcilla inorgánica CH (véase el apéndice A); y considerando el % en peso de la Tabla III.3, la cantidad de cemento que la misma recomienda usar para la elaboración del suelo-cemento varía entre 10 y 14 %, por lo que se tomará un valor promedio entre ambos, siendo entonces de 12 % en peso la cantidad de cemento a agregar a la arcilla para su estabilización.

Tabla III.3. Cantidad de cemento para varios suelos (FUERZA AÉREA E.U.A).

Cantidades de cemento para varios suelos (FUERZA AÉREA E.U.A')				
Clasificación sucs (a)	Rango usual en el contenido de cemento (b)		Contenido de cemento, estimado para la prueba de peso Vol-Hum	Contenido de cemento para las pruebas de humedad secado y congelamiento-deshielo
	% peso	% Vol.		
GW,GP,GM,SW,SP,SM	5 a 7	3 a 5	5	3 a 5 a 7
GM,GP,SM,SP	7 a 9	5 a 8	6	4 a 6 a 8
GM,GC,SM,SC	7 a 10	5 a 9	7	5 a 7 a 9
SP	8 a 12	7 a 11	9	7 a 9 a 11
CL,ML	8 a 12	7 a 12	10	8 a 10 a 12
ML,MH,OH	8 a 12	8 a 13	10	8 a 10 a 12
CL.CH	10 a 14	9 a 15	12	10 a 12 a 14
OH,MH,CH	10 a 14	10 a 16	13	11 a 13 a 15

(a) Con base en las recomendaciones de la Fuerza Aérea U.S.A.
(b) Para la mayoría de los suelos del Horizonte A, el contenido de cemento debería incrementarse en 4% si el suelo es de gris a gris oscuro y 6% si es negro.

3.4 Pruebas de laboratorio para determinar las propiedades físicas del suelo nativo y del suelo-cemento.

- Determinación del Limite Liquido por el método del “Penetrómetro de Cono”.

Se realizó con la metodología mencionada anteriormente. Ver Figura III.8.



Figura III.8. Frascos con suelo a distintas consistencias para realizar la prueba.

- Determinación del Limite Plástico por el método de “La Palma de la Mano o Placa de Vidrio”.

La metodología para realizar esta prueba se menciona anteriormente. Ver Figura III.9.



Figura III.9. Suelo para la elaboración de los rollitos de suelo.

- Determinación del Índice de Plasticidad.

Esta prueba se realizó con la metodología mencionada anteriormente.

- Determinación del Límite de Contracción Volumétrica.

Esta prueba pretende obtener el contenido de humedad por debajo del cual no se presenta cambio adicional en el volumen de una masa de suelo y obtener una indicación cuantitativa del cambio total que puede ocurrir.

La relación de contracción da una indicación de cuánto cambio de volumen puede presentarse por cambios de la humedad de los suelos. La relación de contracción se define como la relación del cambio de volumen del espécimen o muestra de suelo como un porcentaje de su volumen seco al cambio correspondiente en humedad por encima del límite de contracción expresado como un porcentaje del suelo seco obtenido luego de ser secado al horno. Ver Figura III.10.

La metodología de esta prueba está regida por la Norma ASTM D-427.



Figura III.10. Equipo para la prueba de Límite de Contracción Volumétrica.

- Determinación del Límite de Contracción Lineal.

La contracción lineal se define como el porcentaje de contracción, con respecto a la dimensión original, que sufre una barra de suelo de 2 cm x 2 cm x 10 cm al secarse en un horno desde una humedad equivalente a la humedad del límite líquido hasta el límite de contracción. Ver Figura III.11.

La metodología de esta prueba está regida por la Norma ASTM D-457.



Figura III.11. Equipo para la prueba de Límite de Contracción Lineal.

- o Determinación del Peso Específico Seco Máximo y Contenido de Agua Óptimo por la prueba “Proctor Estándar”.

Esta prueba tiene por objetivo determinar la relación del peso volumétrico seco máximo y el contenido de agua óptimo de una muestra de suelo. La prueba tiene tres modalidades (A, B y C) diferenciándose una de otra por el peso del pisón, el diámetro del molde, el volumen del molde, el número de golpes y el número de capas a compactar. El método que se utilizó se determinó mediante la granulometría del suelo, siendo la modalidad A para suelos finos. Ver Figura III.12.

El ensayo consistió en compactar el suelo en tres capas iguales dentro de un molde mediante un pisón que transmite veinticinco golpes a cada capa. Se grafican los valores del peso específico seco contra los correspondientes contenidos de agua para obtener el peso específico seco máximo y el contenido de agua óptimo para el suelo. Ver Figura III.13 y III.14.

El procedimiento para la prueba Proctor Estándar se da en la Norma ASTM D-698.



Figura III.12. Equipo para la prueba Proctor Estándar.



Figura III.13. Suelo compactado dentro del molde.



Figura III.14. Espécimen de suelo compactado fuera del molde.

o Determinación del Índice de Expansión.

Este método provee un índice de expansión potencial de suelos compactados cuando son inundados con agua destilada. Ver Tabla III.4.

En esta prueba, el espécimen se compactó dentro de un anillo de metal de manera que el grado de saturación esté entre 40 y 60%. Posteriormente, el espécimen y el anillo fueron colocados en un consolidómetro. Una presión vertical de confinamiento de 6.9 KPa es aplicada al espécimen y éste es inundado con agua destilada. La deformación del espécimen es registrada durante 24 horas o hasta que la velocidad de deformación llega a ser menor de 0.0005 cm/hr. Un registro mínimo de 3 horas es requerido. Ver Figura III.15, III.16 y III.17.

El procedimiento para esta prueba está basado en las Normas Técnicas ASTM D-4829.

Tabla III.4. Potencial de expansión según su Índice de expansión.

Índice de Expansión (IE)	Potencial de Expansión
0 - 20	Muy bajo
21 - 50	Bajo
51 - 90	Mediano
91 - 130	Alto
> 130	Muy alto



Figura III.15. Equipo para la prueba de Índice de Expansión.



Figura III.16. Compactación del suelo dentro del molde.



Figura III.17. Suelo compactado en el anillo y partes del equipo del molde de la prueba.

- Método estándar para la elaboración y curado de especímenes de suelo-cemento.

Este método hace mención al procedimiento que se debe adoptar para la elaboración y curado de los especímenes de suelo-cemento que serán sometidos a la prueba de compresión simple.

Este método tiene su referencia en la Norma ASTM D-1632-87.

A continuación se describe el equipo requerido para la realización de este método:

- Aparato de compactación.
- Moldes de pvc de 7.1 cm de diámetro y 22 cm de altura.
- 1 extensión para los moldes.
- 1 clip para los moldes.
- Gato hidráulico.



Figura III.18. Equipo para la elaboración de los especímenes.

El procedimiento utilizado y al cual hace alusión el método es el siguiente:

1. Se toma una muestra representativa de suelo y se le incorpora cemento Portland hasta conseguir un 12% en peso del mismo, mezclándose ambos materiales hasta lograr su homogenización. Ver Figura III.19.
2. Se agrega la cantidad de agua óptima obtenida en la prueba proctor estándar y se mezcla revolviendo el material.
3. Se prepara el equipo a utilizar lubricando los moldes y las demás partes móviles del mismo, así como también colocando el clip en la parte inferior de la base.
4. Se coloca el suelo en el molde en tres capas iguales. En cada capa se aplican golpes mediante el martillo para reducir el aire atrapado y dar compactación al suelo. Ver Figura III.20.
5. Antes de colocar la tercer capa, se coloca la extensión al molde y en la parte superior se coloca la placa de acero, se dan golpes hasta que la placa baje lo suficiente como para topar con la extensión colocada.
6. Se retira el molde y se deja curar por un periodo de aproximadamente 18 horas. El curado se efectúa dejando el molde en un cuarto hermético y con una temperatura templada.
7. Transcurrido ese tiempo se procede a retirar el espécimen de suelo del molde con la ayuda del gato hidráulico.

8. Una vez extraído el espécimen de suelo se deja curar por el periodo de tiempo requerido. El curado se efectúa envolviendo el espécimen en manta e impregnándolo de agua, para después introducirlo en una bolsa hermética.



Figura III.19. Adición de cemento al suelo y preparación del equipo para la prueba.



Figura III.20. Colocación del suelo en el molde y compactación del mismo en su interior.

- Determinación de la Resistencia a la Compresión Simple y Módulo de Elasticidad.

Esta prueba se realizó aplicando un esfuerzo axial a una muestra de suelo hasta llevarlo a la falla. A medida que la muestra de suelo se deforma crecientemente se obtienen cargas correspondientes. Se registran las cargas de falla y deformación. Estos datos se utilizan para calcular las áreas corregidas y la resistencia a la compresión. El procedimiento para esta prueba tiene su referencia en la Norma ASTM D-2166 - 66. Ver Figura III.21, III.22 y III.23.

La resistencia a la compresión simple fue calculada de la siguiente forma:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Donde:

- σ = Resistencia a la compresión simple (Kg/cm²).
- P = Carga aplicada (Kg).
- A = Área de la base (cm²).

El modulo de elasticidad es la pendiente del tramo recto inicial de la curva y se cálculo de la siguiente forma:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Donde:

- E = Modulo de Elasticidad.
- σ = Esfuerzo.
- ϵ = Deformación Unitaria.



Figura III.21. Máquina para la prueba de Compresión Simple.



Figura III.22. Espécimen de suelo sometido a compresión simple.



Figura III.23. Especímenes después de haber sido sometidos a la prueba de compresión simple.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de seguir la metodología propuesta anteriormente, fue posible llegar a los siguientes resultados.

4.1 Pruebas de laboratorio para la clasificación del suelo en estudio.

○ Análisis Granulométrico.

Después de pasar 500 gr de suelo con lavado por la malla No. 200 se obtuvieron los siguientes resultados.

- % Retenido = 19.68
- % Que pasa = 80.32

- Determinación del Limite Liquido (LL) por el método del “Penetrómetro de Cono”.
 - Limite Liquido (LL) = 54.00 %
- Determinación del Limite Plástico (LP) por el método de “La Palma de la Mano o Placa de Vidrio”.
 - Limite Plástico (LP) = 26.00 %
- Determinación del Índice de Plasticidad (IP).
 - Índice de Plasticidad (IP) = 28.00 %

Con los resultados obtenidos anteriormente y mediante los dos métodos de clasificación ya establecidos, el suelo en estudio se clasifico como:

- Método SUCS = CH Inorgánico; $LL \geq 50$; PI se grafica sobre o arriba de la línea A.
- Método AASHTO = A – 7 – 5 Suelo arcilloso que más del 35 % pasa el tamiz No. 200 y su $LP < 30$.

En el apéndice A se muestra la memoria de cálculos de los Límites de Consistencia y la clasificación del suelo mediante los dos métodos.

4.2 Pruebas de laboratorio para determinar las propiedades físicas del suelo nativo y del suelo-cemento.

- Suelo Nativo.
 - Límite Liquido (LL) = 54.00 %
 - Límite Plástico (LP) = 26.00 %
 - Índice de Plasticidad (IP) = 28.00 %
 - Límite de Contracción Volumétrica (L_C) = 7.982 %
 - Límite de Contracción Lineal (C.L) = 14.703 %
 - Peso Específico Seco Máximo (Prueba Proctor Estándar) = 1600 Kg / m³

- Contenido de Agua Óptimo (Prueba Proctor Estándar) = 21.40 %
- Índice de Expansión (IE_{50}) = 59.99
- Resistencia a la Compresión Simple:
 - 2 Días de curado = 1.706 Kg / cm²
 - 7 Días de curado = 2.389 Kg / cm²
 - 28 Días de curado = 4.778 Kg / cm²

Como se puede apreciar, conforme se incrementan los días de curado de los especímenes elaborados con suelo nativo, presentan una ganancia en la resistencia a la compresión en comparación con los especímenes con menos días de curado.

En el apéndice B se muestra la memoria de cálculos de las pruebas para determinar las propiedades físicas del suelo nativo.

o Suelo-Cemento.

- Límite Líquido (LL) = 46.00 %
- Límite Plástico (LP) = 21.00 %
- Índice de Plasticidad (IP) = 25.00 %
- Límite de Contracción Volumétrica (L_C) = 12.385 %
- Límite de Contracción Lineal (C.L) = 1.633 %
- Peso Específico Seco Máximo (Prueba Proctor Estándar) = 1625 Kg / m³
- Contenido de Agua Óptimo (Prueba Proctor Estándar) = 23.70 %
- Índice de Expansión (IE_{50}) = 2.84
- Resistencia a la Compresión Simple:
 - 2 Días de curado = 9.072 Kg / cm²

- 7 Días de curado = 22.241 Kg / cm²
- 28 Días de curado = 56.455 Kg / cm²

Como se puede apreciar, conforme se incrementan los días de curado de los especímenes elaborados con suelo-cemento, presentan una ganancia en la resistencia a la compresión en consideración con los especímenes con menos días de curado.

En el apéndice C se muestra la memoria de cálculos de las pruebas para determinar las propiedades físicas del suelo-cemento.

4.3 Gráficas comparativas de las propiedades del suelo nativo y las propiedades del suelo-cemento.

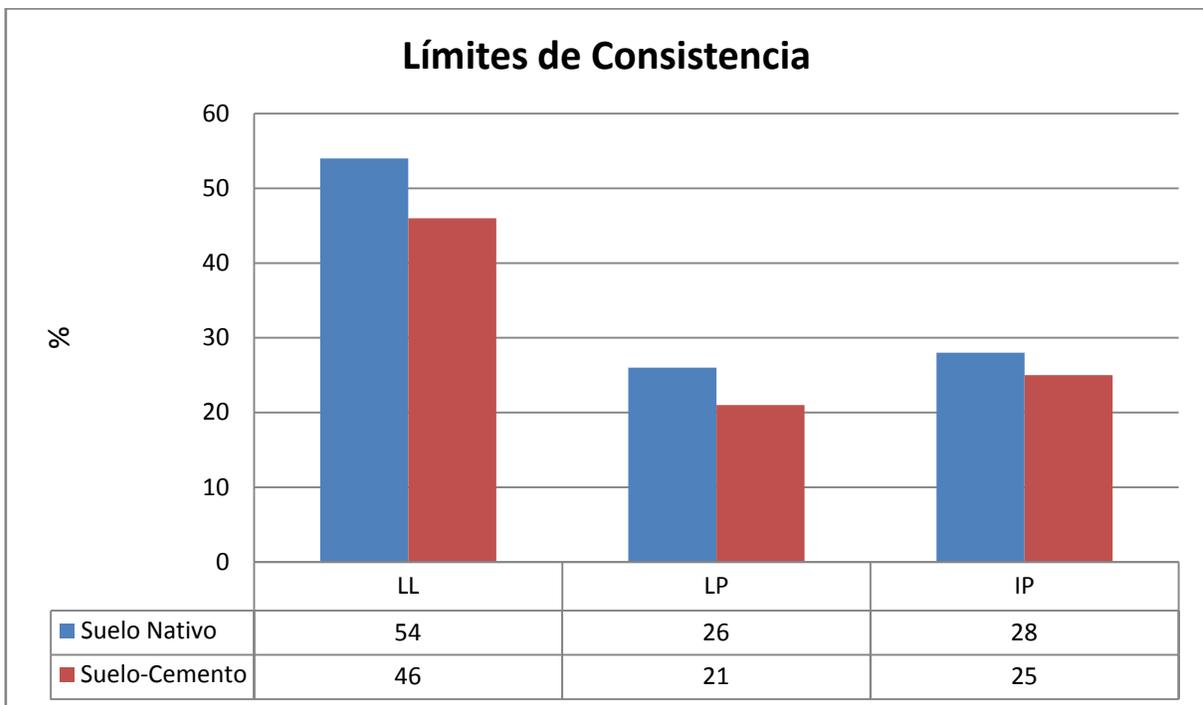


Figura IV.1. Comparación de los límites de consistencia del suelo nativo y del suelo-cemento.

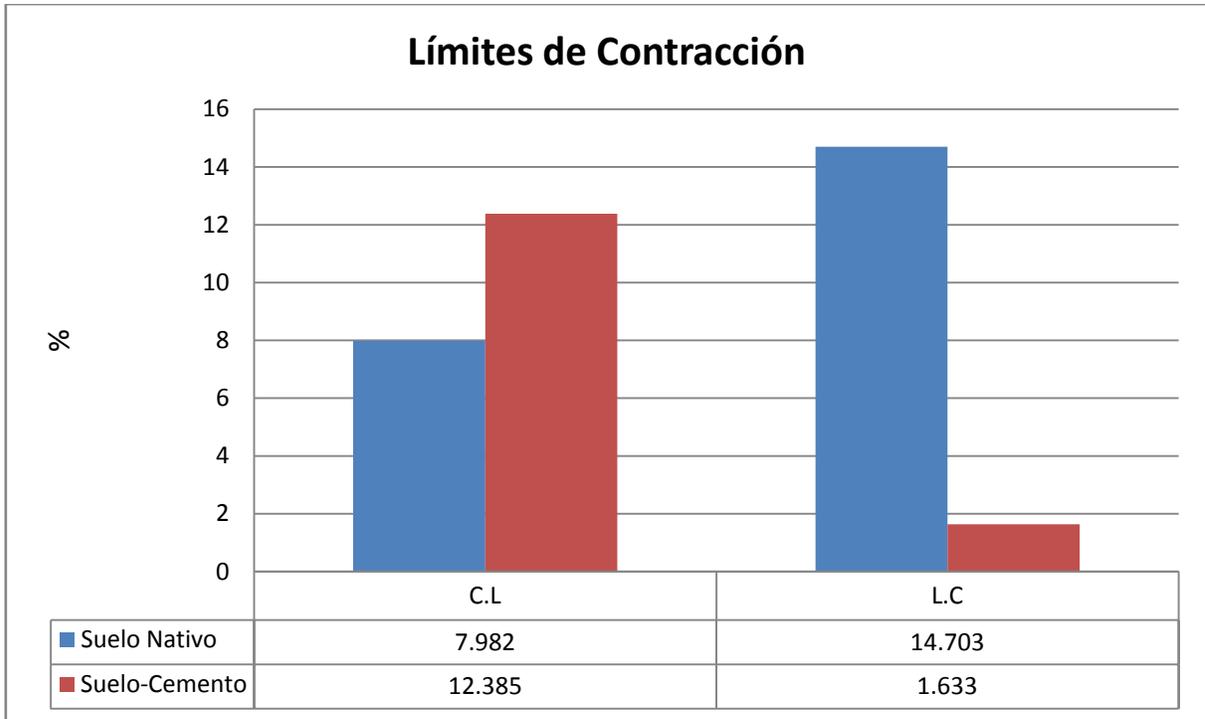


Figura IV.2. Comparación de los límites de contracción del suelo nativo y del suelo-cemento.

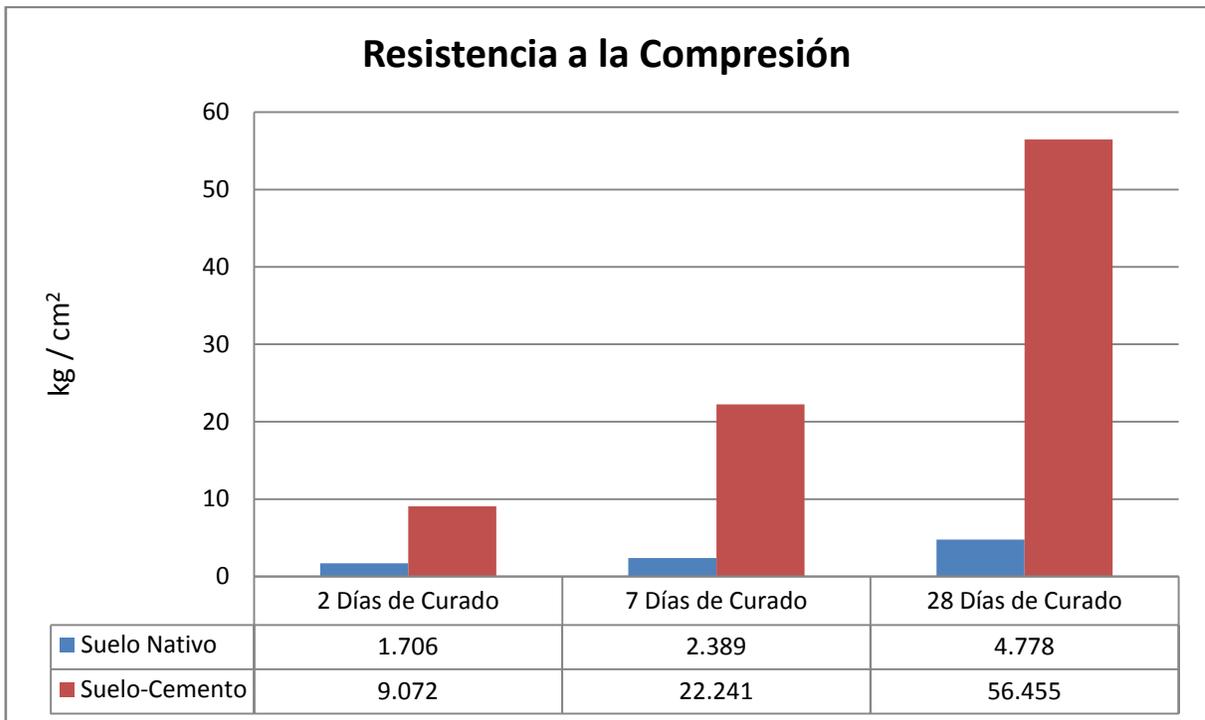


Figura IV.3. Comparación de la resistencia a la compresión de los especímenes de suelo nativo y suelo-cemento, según su tiempo de curado.



Figura IV.4. Comparación del peso específico seco máximo que presentaron los especímenes de suelo nativo y suelo-cemento.

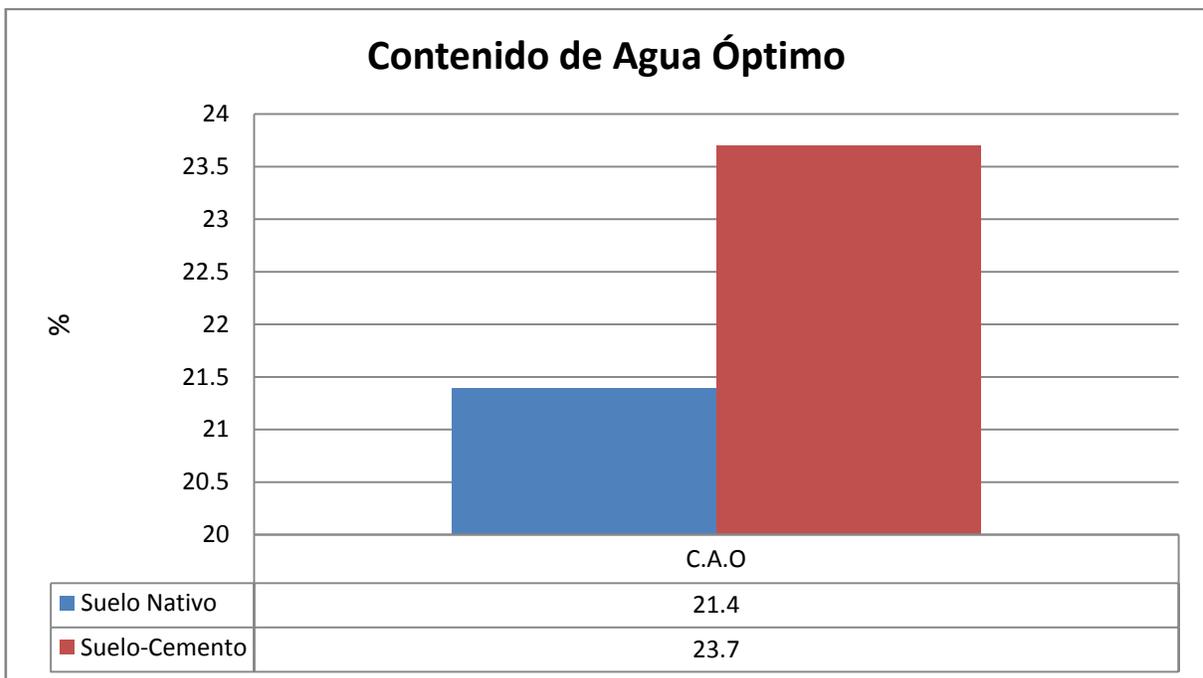


Figura IV.5. Comparación del contenido de agua óptimo que presentaron los especímenes de suelo nativo y suelo-cemento.

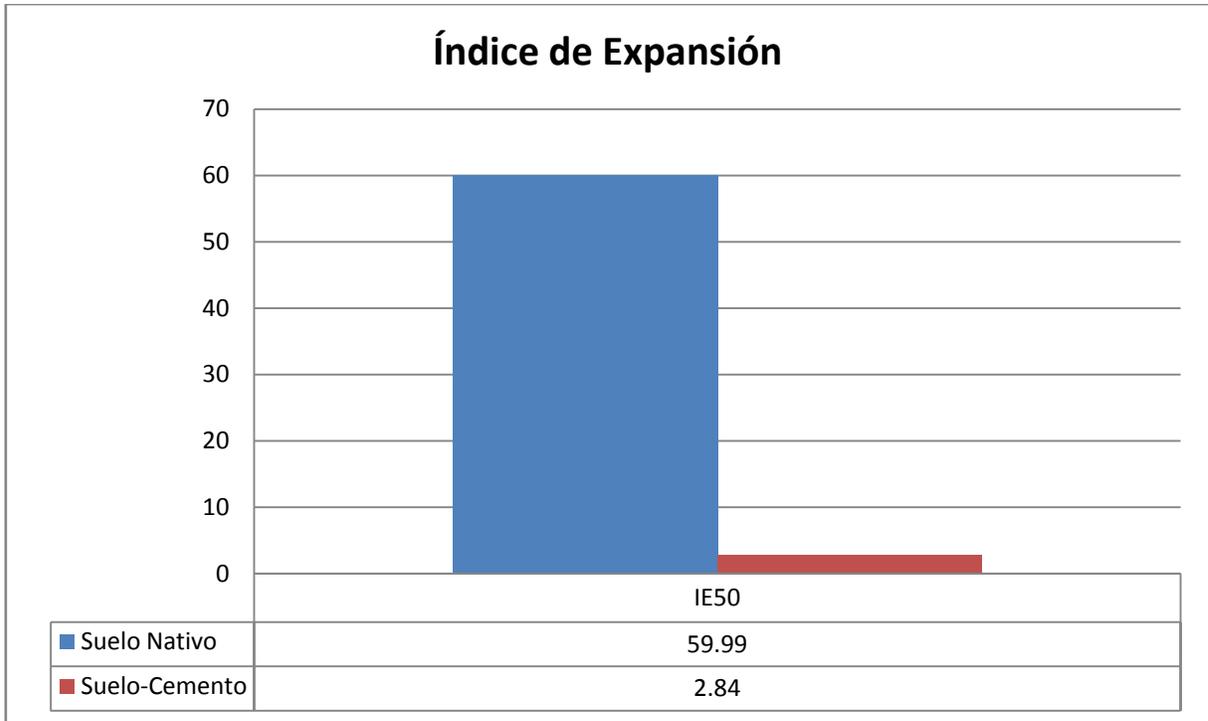


Figura IV.6. Comparación del índice de expansión del suelo nativo y del suelo-cemento.

V. CONCLUSIONES

La técnica de estabilización involucra una buena disgregación del suelo, adición del cemento, mezclado en seco y adición del agua tanto de fraguado como la necesaria para la compactación. Una vez hidratado el cemento, se obtiene una mezcla más dura y resistente que un suelo sin estabilizar.

De acuerdo al problema planteado y a los objetivos establecidos con anterioridad (Capítulo I), y una vez realizadas todas las pruebas establecidas en la metodología, fue posible llegar a la conclusión siguiente.

En general, la técnica utilizada para efectuar una buena estabilización con cemento, considera la durabilidad y la resistencia, así como también su acción en contra de propiedades problemáticas de los suelos arcillosos como la son la plasticidad y el potencial expansivo, repercutiendo estos criterios en la economía.

Como respuesta global al problema planteado, es acertado decir que los efectos del cemento Portland en las propiedades físicas de un suelo arcilloso de la región son en gran medida benéficos para el mismo, ya que aumenta significativamente su resistencia, disminuye en alguna medida su plasticidad y eliminan casi por completo su potencial expansivo.

A continuación se detallan las conclusiones de los resultados obtenidos de cada una de las pruebas realizadas, tanto al suelo nativo como al suelo-cemento.

- **Limites de Plasticidad.**

- **Límite Líquido.** Este se redujo en un 14.81 % en el suelo-cemento en relación con el suelo nativo.
- **Límite Plástico.** Este se redujo en un 19.23 % en el suelo-cemento en relación con el suelo nativo.
- **Índice de Plasticidad.** Este se redujo en un 10.71 % en el suelo-cemento en relación con el suelo nativo.

- **Limites de Contracción.**

- **Volumétrica.** Este aumentó en un 35.55 % en el suelo-cemento en relación con el suelo nativo.
- **Lineal.** Este se redujo en un 88.89 % en el suelo-cemento en relación con el suelo nativo.

- **Peso Específico Seco Máximo.** Este aumentó en un 1.54 % en el suelo-cemento en relación con el suelo nativo.

- **Contenido de Agua Optima.** Este aumentó en un 9.70 % en el suelo-cemento en relación con el suelo nativo.
- **Índice de Expansión.** Este se redujo en un 95.26 % en el suelo-cemento en relación con el suelo nativo.
- **Resistencia a la Compresión Simple.** Los especímenes elaborados con suelo-cemento presentaron una mayor resistencia a la compresión simple, siendo esta mayor en un 90 % en relación con los elaborados con el suelo nativo; así también los especímenes elaborados con suelo nativo presentaron una mayor capacidad de deformación, siendo esta mayor en un 63.46 % en relación con los elaborados con suelo-cemento.

BIBLIOGRAFÍA

- Juárez Badillo Eulalio y Rico Rodríguez Alfonso (2001). Mecánica de Suelos. Tomo I. Fundamentos de la Mecánica de Suelos: Limusa.
- Fernández Loaiza Carlos. (1982). Mejoramiento y Estabilización de Suelos: Limusa.
- De la Fuente Lavalle Eduardo. (1995). Suelo-Cemento: Usos, propiedades y aplicaciones: IMCYC.
- <http://www.arquba.com/monografias-de-arquitectura/cemento-portland-usos-y-aplicaciones/>
- <http://www.ingenieracivil.com/2008/04/estabilizacin-de-suelos.html>
- <http://www.constructorcivil.org/2010/04/ensayo-de-compresion-simple.html>
- <http://www.constructorcivil.org/2010/05/clasificacion-de-suelos-segun-aashto.html>
- http://e-ciencia.com/recursos/enciclopedia/Clasificaci%C3%B3n_de_suelos
- <http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/arcillas.htm#introd>
- <http://www.imcyc.com/ct2008/mar08/ingenieria.htm>

APÉNDICE A

CÁLCULOS DE LOS LÍMITES DE CONSISTENCIA Y CLASIFICACIÓN DEL SUELO EN ESTUDIO

- Análisis Granulométrico.

LAVADO POR LA MALLA No. 200	
Peso Suelo (gr)	500
Peso Tara (gr)	81.40
Peso Suelo retenido en la malla # 200 + Tara (gr)	179.80
Peso Suelo retenido en la malla # 200 (gr)	98.40
Peso Suelo que pasa la malla # 200 (gr)	401.60
% Retenido	19.68
% Que pasa	80.32

- Determinación del Límite Líquido (LL) por el método del “Penetrómetro de Cono”.

LIMITE LIQUIDO (LL)								
Prueba No.:	1		2		3		4	
Penetración del cono (mm)	6.50	6.50	14.20	14.30	22.50	22.60	30.50	30.70
Penetración Promedio del cono (mm)	6.50		14.25		22.55		30.60	
Recipiente No:	1		2		3		4	
Peso Recipiente + Suelo húmedo (gr)	117.00		127.90		136.50		135.00	
Peso Recipiente + Suelo seco (gr)	96.30		102.80		104.50		102.30	
Peso Recipiente (gr)	46.20		50.80		44.00		46.10	
Peso suelo seco (gr)	50.10		52.00		60.50		56.20	
Peso de agua (gr)	20.70		25.10		32.00		32.70	
Contenido de humedad (%)	41.317		48.269		52.893		58.185	
Penetración (mm)	20		Clasificación SUCS			CH		
Límite Líquido (LL)	53.90							

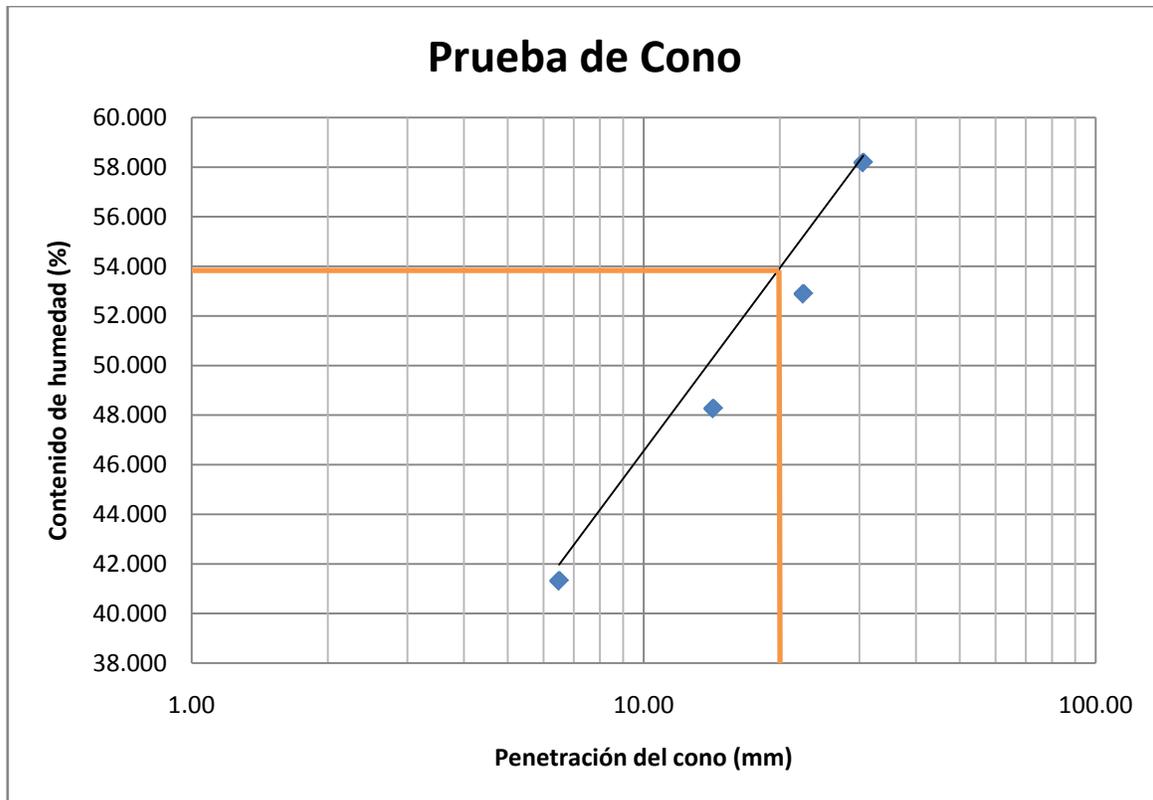


Figura 1. Grafica para la determinación del Límite Líquido.

- Determinación del Límite Plástico (LP) por el método de “La Palma de la Mano o Placa de Vidrio”.

LIMITE PLÁSTICO (LP)			
Prueba No:	1	2	3
Recipiente No:	1	2	3
Peso Recipiente + Suelo húmedo (gr)	51.20	53.10	48.30
Peso Recipiente + Suelo seco (gr)	50.70	52.60	47.80
Peso Recipiente (gr)	48.80	50.60	46.00
Peso suelo seco (gr)	1.90	2.00	1.80
Peso de agua (gr)	0.50	0.50	0.50
Contenido de humedad (%)	26.316	25.000	27.778
Límite Plástico (LP)	26.36	Clasificación SUCS	CH

- Clasificación del suelo en estudio según el sistema de clasificación SUCS.

Debido a que de la prueba de granulometría se obtuvo que el 80.32 % del suelo pasa la malla No. 200, es posible afirmar que el suelo en estudio se trata de un suelo fino. Por ello la clasificación del suelo se puede hacer por medio de la carta de plasticidad SUCS.

Con los valores del Límite Líquido y el Índice de Plasticidad se situó en la carta que el suelo pertenece a un suelo CH, siendo este una arcilla inorgánica de alta plasticidad

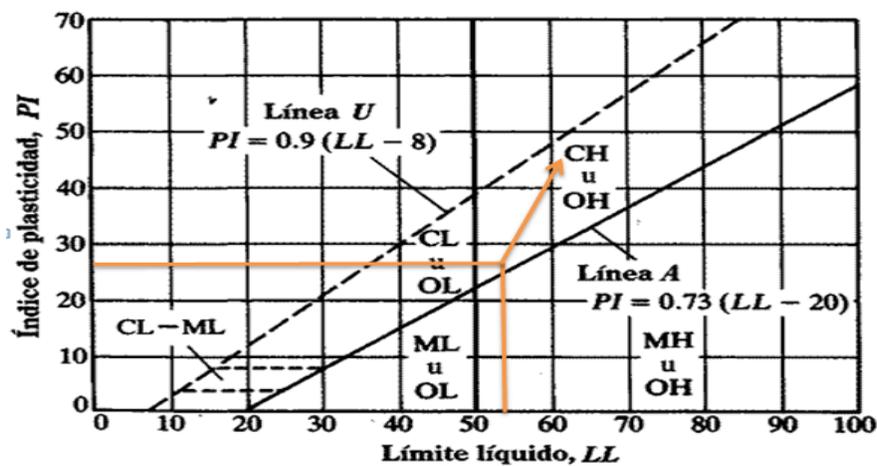


Figura 2. Carta de Plasticidad para la clasificación del suelo.

Tabla 1. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS; símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos.

Símbolo de grupo	Criterios
CL	Inorgánico; $LL < 50$; $PI > 7$; se grafica sobre o arriba de la línea A
ML	Inorgánico; $LL < 50$; $PI < 4$; o se grafica debajo de la línea A
OL	Orgánico; LL - seco en horno) / (LL - sin secar) ; < 0.75 ; $LL < 50$
CH	Inorgánico; $LL \geq 50$; PI se grafica sobre o arriba de la línea A
MH	Inorgánico; $LL \geq 50$; PI se grafica debajo de la línea A
OH	Orgánico; LL - seco en horno) / (LL - sin secar) ; < 0.75 ; $LL \geq 50$
CL - ML	Inorgánico; se grafica en la zona sombreada
P_t	Turba, lodos y otros suelos altamente orgánicos

- Clasificación del suelo en estudio según el sistema de clasificación AASHTO.

Tabla 2. Clasificación de suelos según AASHTO.

TABLA N° 1 : Clasificación de Suelos según AASHTO

CLASIFICACION GENERAL	Materiales Granulares (igual o menor del 35% pasa el tamiz N° 200)							Materiales Limo - Arcillosos (más del 35% que pasa el tamiz N° 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
GRUPOS	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
SUB - GRUPOS	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
% que pasa el Tamiz:											
N° 10	50 máx.										
N° 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.								
N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características del Material que pasa el tamiz N° 40											
Límite Líquido			NO PLÁSTICO	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 máx.
Índice de Plasticidad	6máx.	6 máx.		10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Tipos de Material	fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Grava, arenas limosas y arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
Terreno de Fundación	Excelente a Bueno							Regular a Deficiente			
NOTA: El índice de plasticidad de los suelos A-7-5 es igual o menor que su Límite Líquido 30, el de los A-7-6 mayor que su Límite Líquido (fig. 1) se halla indicada la relación entre lo LL e IP de los materiales finos. Dicho de otro modo, el grupo A-7 es subdividido en A-7-5 ó A-7-6 dependiendo del Límite Plástico (L.P.) Si el LP \geq 30, la clasificación es A-7-6 Si el LP < 30, la clasificación es A-7-5											

Considerando más del 35 % (80.23 %) del suelo paso la malla No. 200 y que el Límite Plástico es menor que 30 (26.36), el suelo en estudio se sitúa en el grupo A-7-5 siendo este un suelo arcilloso.

APÉNDICE B

CÁLCULOS DE LAS PRUEBAS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO NATIVO

- Límite Líquido (LL).

LIMITE LIQUIDO (LL)								
Prueba No.:	1		2		3		4	
Penetración del cono (mm)	6.50	6.50	14.20	14.30	22.50	22.60	30.50	30.70
Penetración Promedio del cono (mm)	6.50		14.25		22.55		30.60	
Recipiente No:	1		2		3		4	
Peso Recipiente + Suelo húmedo (gr)	117.00		127.90		136.50		135.00	
Peso Recipiente + Suelo seco (gr)	96.30		102.80		104.50		102.30	
Peso Recipiente (gr)	46.20		50.80		44.00		46.10	
Peso suelo seco (gr)	50.10		52.00		60.50		56.20	
Peso de agua (gr)	20.70		25.10		32.00		32.70	
Contenido de humedad (%)	41.317		48.269		52.893		58.185	
Penetración (mm)	20							
Límite Líquido (LL)	53.90							

- Límite Plástico (LP).

LIMITE PLÁSTICO (LP)			
Prueba No:	1	2	3
Recipiente No:	1	2	3
Peso Recipiente + Suelo húmedo (gr)	51.20	53.10	48.30
Peso Recipiente + Suelo seco (gr)	50.70	52.60	47.80
Peso Recipiente (gr)	48.80	50.60	46.00
Peso suelo seco (gr)	1.90	2.00	1.80
Peso de agua (gr)	0.50	0.50	0.50
Contenido de humedad (%)	26.316	25.000	27.778
Límite Plástico (LP)	26.36		

- Índice de Plasticidad (IP).

ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP)	
Límite Líquido (LL)	53.90
Límite Plástico (LP)	26.36
Índice de Plasticidad (LL - LP)	27.54

- Límite de Contracción Volumétrica (L_C).

LÍMITE DE CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA (LC)	
Petri No:	1
Peso Petri + Suelo húmedo (gr)	47.50
Peso Petri + Suelo seco (gr)	38.80
Peso Petri (gr)	19.90
Peso suelo seco (gr)	18.90
Peso de agua (gr)	8.70
Contenido de humedad (%)	46.032
Peso Volumétrico del Hg (gr/cm ³)	13.530
Peso Petri + Hg (gr)	243.90
Volumen del Petri (cm ³)	16.56
Peso Petri vidrio + Hg (gr)	799.50
Peso Petri vidrio + Hg - Suelo seco (gr)	672.80
Peso de Hg desalojado (gr)	126.70
Volumen final del suelo (cm ³)	9.364
Límite de Contracción Volumétrica (LC)	7.982

- Límite de Contracción Lineal (C.L).

Contracción Lineal (CL)				
Muestra	Li (cm)	Lf (cm)	Li - Lf (cm)	CL (%)
1	10.350	8.785	1.565	15.121
2	9.940	8.520	1.420	14.286
Promedio				14.703

- Peso Específico Seco Máximo y Contenido de Agua Óptima (Prueba Proctor Estándar).

Datos	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Peso Molde + Base (Kg)	3.677	3.677	3.677	3.677	3.677
Peso Molde + Base + Suelo húmedo (Kg)	5.195	5.340	5.481	5.433	5.349
Peso Suelo (Kg)	1.518	1.663	1.804	1.756	1.672
Volumen Molde (m ³)	0.0009433	0.0009433	0.0009433	0.0009433	0.0009433
Peso Porcelana (Kg)	0.0882	0.08180	0.06400	0.05040	0.04600
Peso Porcelana + Suelo húmedo (Kg)	0.1819	0.1865	0.1742	0.1582	0.1546
Peso Porcelana + Suelo seco (Kg)	0.1725	0.1713	0.1548	0.1347	0.1271
Contenido de humedad (%)	11.15	16.98	21.37	27.88	33.91

Muestra	Contenido de humedad (%)	γ_m (Kg/m ³)	γ_d (Kg/m ³)	γ_{zva} (Kg/m ³)
1	11.15	1609.24	1447.80	1723.04
2	16.98	1762.96	1507.02	1611.94
3	21.37	1912.44	1575.76	1537.59
4	27.88	1861.55	1455.74	1469.79
5	33.91	1772.50	1323.66	1388.17

Datos a Graficar		
γ_d (Kg/m ³)	W (%)	γ_{zva} (Kg/m ³)
1447.80	11.15	2075.22
1507.02	16.98	1851.16
1575.76	21.37	1712.25
1455.74	27.88	1540.51
1323.66	33.91	1409.53
γ_{dmax} (Kg/m ³)	1600.00	
W_{opt} (%)	21.40	
γ_m (Kg/m ³)	1942.40	

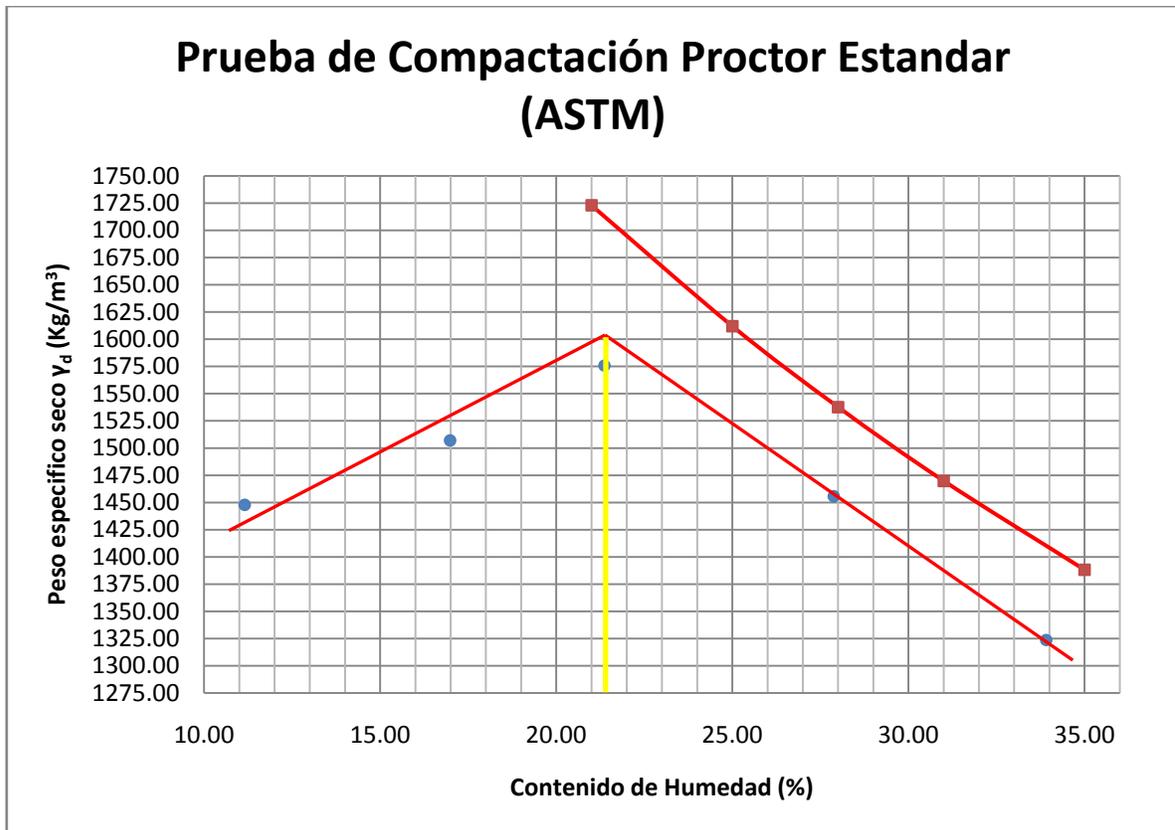


Figura 3. Grafica para determinar el contenido de humedad óptima y el peso específico seco máximo.

- Índice de Expansión (IE_{50}).

CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
Peso Capsula (gr)	520.20
Peso Capsula + Suelo húmedo (gr)	820.20
Peso Capsula + Suelo seco (gr)	780.20
Contenido de humedad (%)	15.38
DATOS DEL SUELO COMPACTADO EN ANILLO	
Altura del espécimen (cm)	2.54
Diámetro (cm)	10.18
Área (cm ²)	81.39
Volumen espécimen (cm ³)	206.74
S_s	2.70
Peso anillo (gr)	202.20
Peso anillo + Suelo (gr)	529.60
Peso Suelo (gr)	327.40

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE EXPANSIÓN	
Altura Inicial (cm)	0.0556768
Altura Final (cm)	0.221234
Diferencia de Altura	0.1655572
γ_d	1.37
S	42.95
IE_{med}	65.18
IE_{50}	59.99
Potencial de Expansión Mediano	

Índice de Expansión (IE)	Potencial de expansión
0 - 20	Muy bajo
21 - 50	Bajo
51 - 90	Mediano
91 - 130	Alto
> 130	Muy alto

- Resistencia a la Compresión Simple.

Calculo de las dimensiones de los especímenes, su peso volumétrico, carga máxima, resistencia a la compresión simple y modulo de elasticidad.

% de Cemento	# de Especimen	Días de Curado	Resistencia a la Compresión σ (Kg/cm ²)	Peso Volumétrico γ_m (gr/cm ³)	Modulo de Elasticidad (Kg/cm ²)
12	1	2	1.706	1.893	33.333
12	2	2	1.706	1.875	40.000
12	1	7	2.275	1.901	45.454
12	2	7	2.503	1.842	50.000
12	1	28	4.380	1.981	80.000
12	2	28	5.176	2.006	120.000

2 Días de Curado			
Especimen 1		Especimen 2	
Diámetro (cm) =	7.125	Diámetro (cm) =	7.125
Altura (cm) =	17.000	Altura (cm) =	16.920
Peso (gr) =	1282.9	Peso (gr) =	1265.2
Área de la Base (cm ²) =	39.871	Área de la Base (cm ²) =	39.871
Volumen (cm ³) =	677.812	Volumen (cm ³) =	674.623
γ_m (gr/cm ³) =	1.893	γ_m (gr/cm ³) =	1.875
Carga Máxima (Kg) =	68.039	Carga Máxima (Kg) =	68.039
σ (Kg/cm ²) =	1.706	σ (Kg/cm ²) =	1.706

7 Días de Curado			
Especimen 1		Especimen 2	
Diámetro (cm) =	7.125	Diámetro (cm) =	7.125
Altura (cm) =	16.795	Altura (cm) =	16.700
Peso (gr) =	1273.1	Peso (gr) =	1226.4
Área de la Base (cm ²) =	39.871	Área de la Base (cm ²) =	39.871
Volumen (cm ³) =	669.639	Volumen (cm ³) =	665.851
γ_m (gr/cm ³) =	1.901	γ_m (gr/cm ³) =	1.842
Carga Máxima (Kg) =	90.718	Carga Máxima (Kg) =	99.790
σ (Kg/cm ²) =	2.275	σ (Kg/cm ²) =	2.503

28 Días de Curado			
Especimen 1		Especimen 2	
Diámetro (cm) =	7.125	Diámetro (cm) =	7.125
Altura (cm) =	16.700	Altura (cm) =	16.850
Peso (gr) =	1319	Peso (gr) =	1347.6
Área de la Base (cm ²) =	39.871	Área de la Base (cm ²) =	39.871
Volumen (cm ³) =	665.851	Volumen (cm ³) =	671.832
γ_m (gr/cm ³) =	1.981	γ_m (gr/cm ³) =	2.006
Carga Máxima (Kg) =	174.632	Carga Máxima (Kg) =	206.383
σ (Kg/cm ²) =	4.380	σ (Kg/cm ²) =	5.176

Graficas de los especímenes sometidos a la prueba de Resistencia a la Compresión Simple.

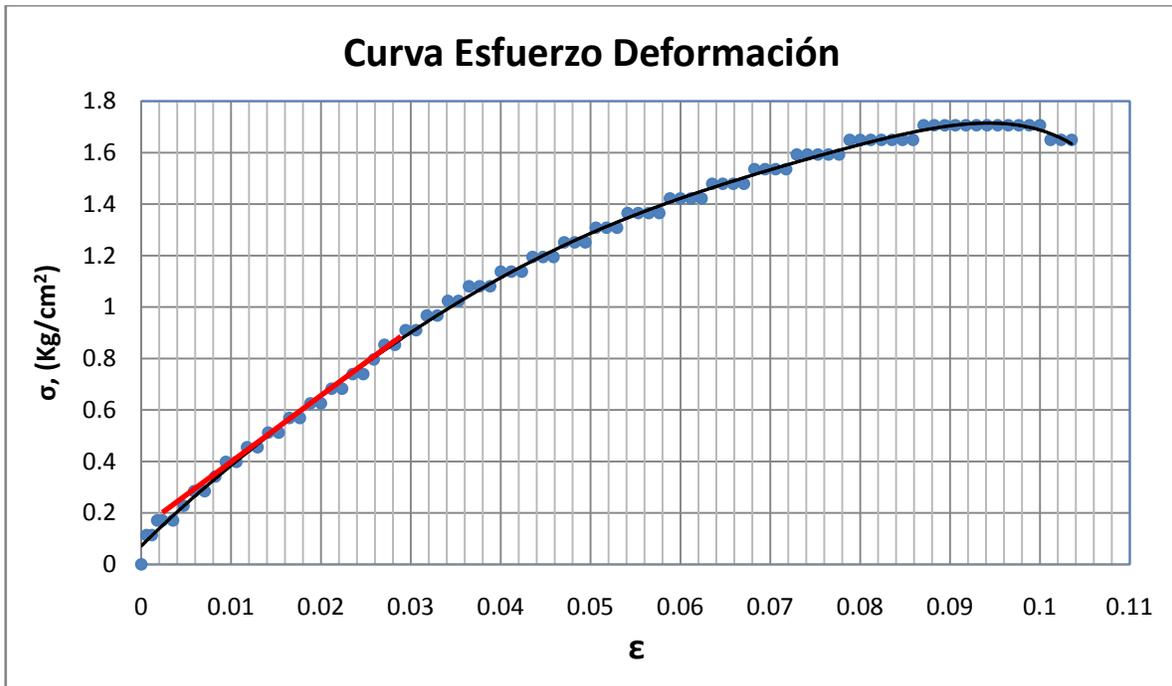


Figura 4. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 1 a los 2 días de curado.

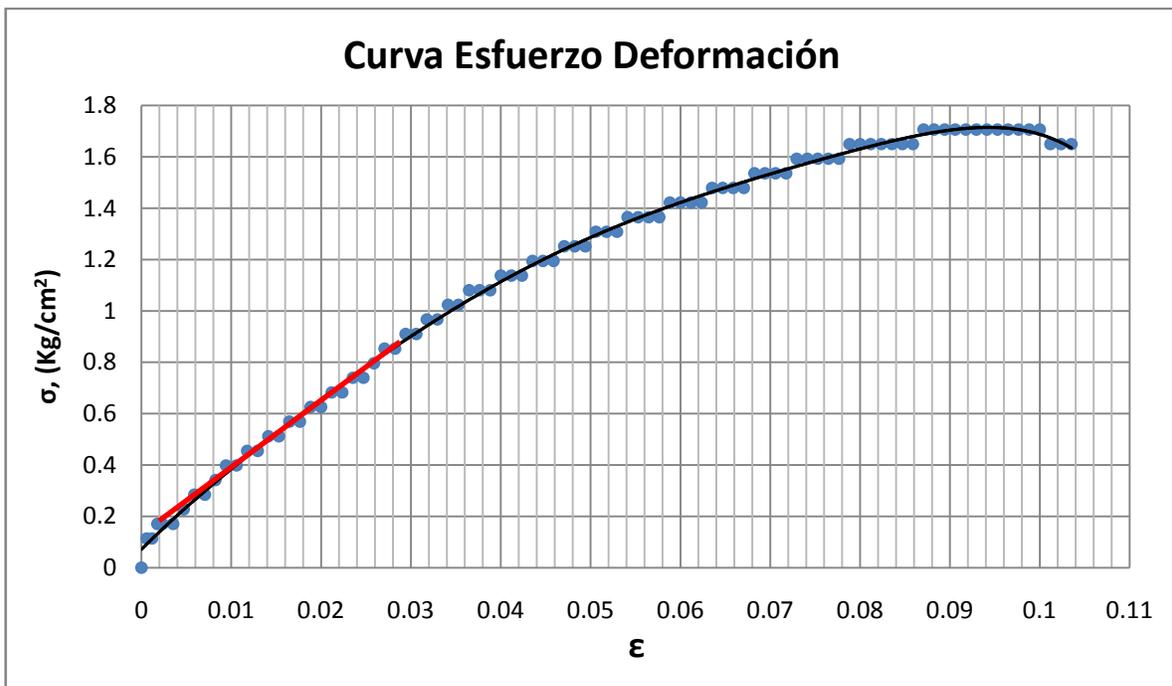


Figura 5. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 2 a los 2 días de curado.

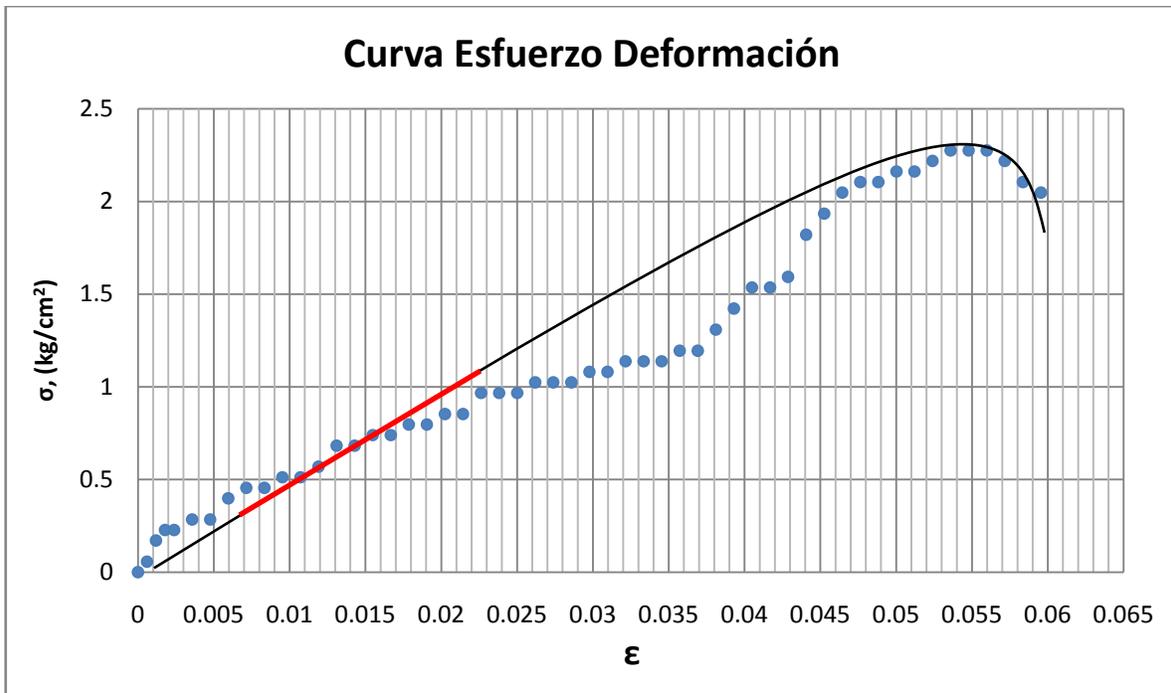


Figura 6. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 1 a los 7 días de curado.

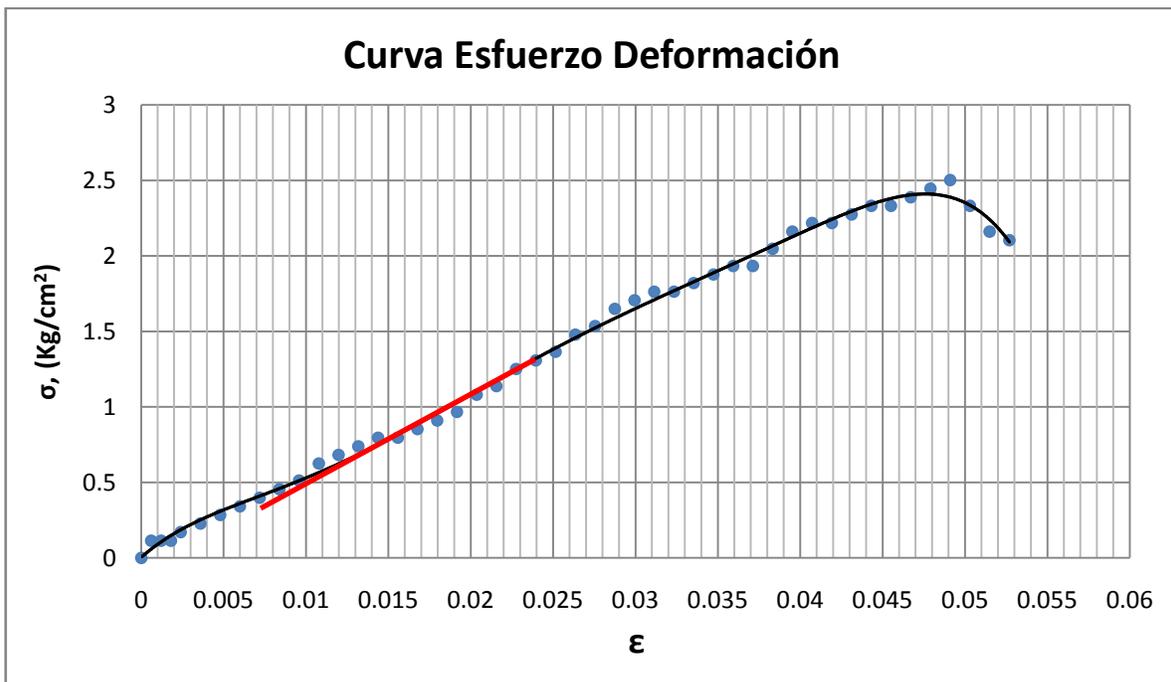


Figura 7. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 2 a los 7 días de curado.

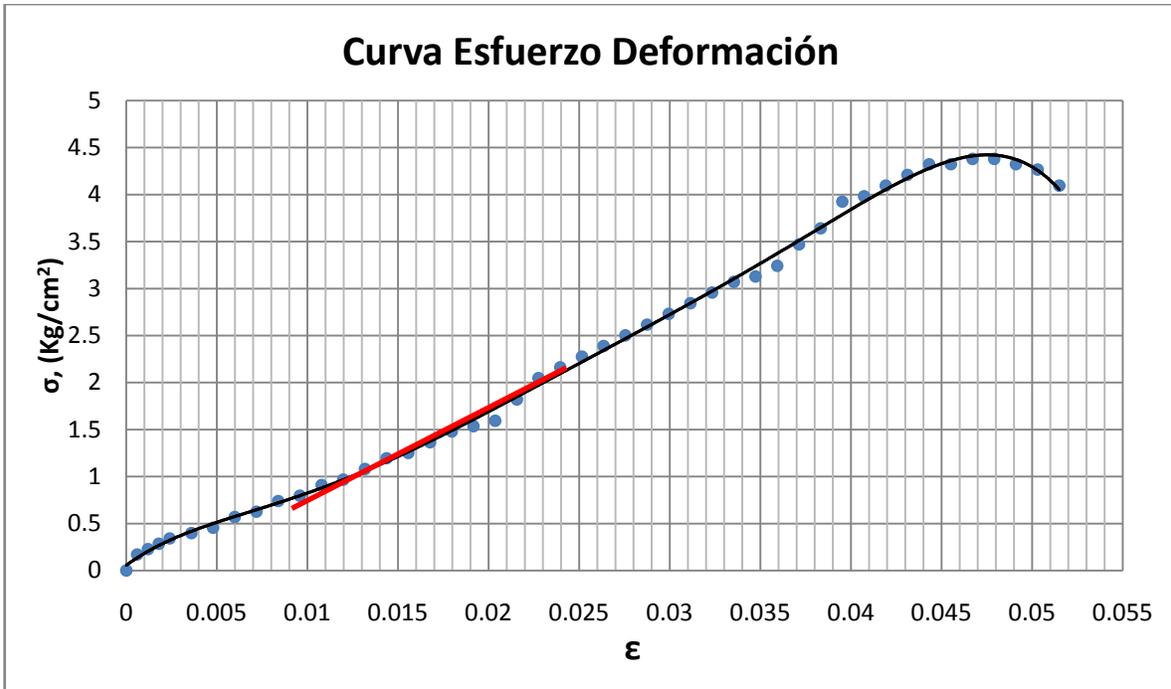


Figura 8. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 1 a los 28 días de curado.

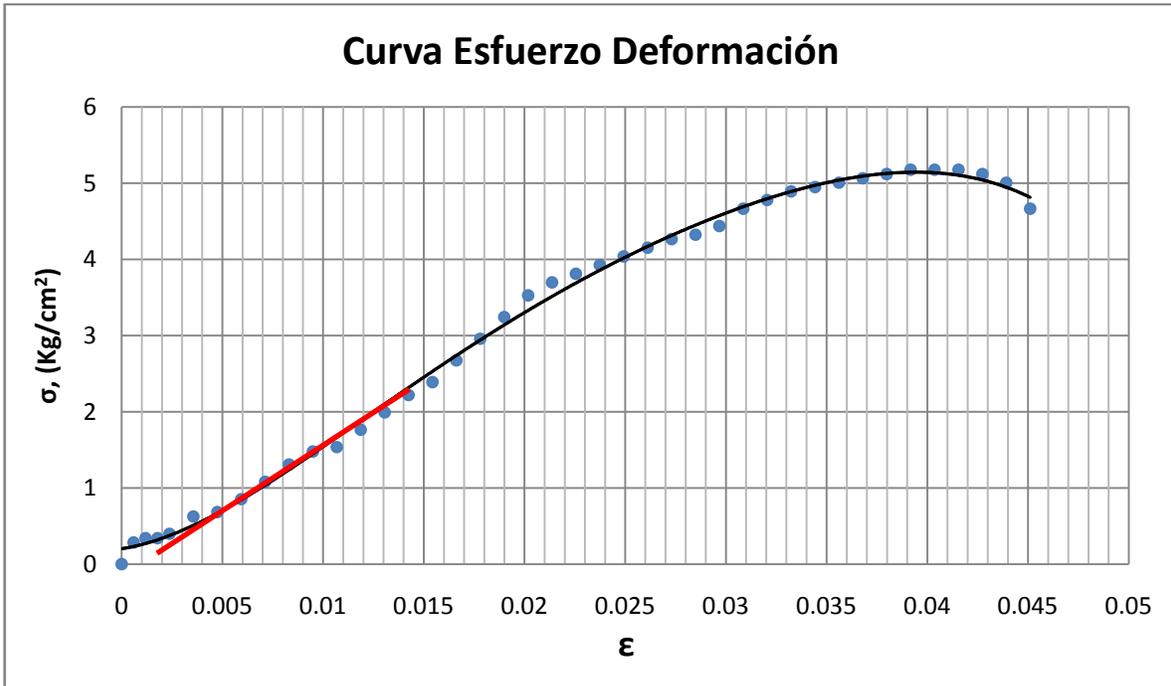


Figura 9. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 2 a los 28 días de curado.

APÉNDICE C

CÁLCULOS DE LAS PRUEBAS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO-CEMENTO

- Límite Líquido (LL).

LIMITE LIQUIDO (LL)								
Prueba No:	1		2		3		4	
Penetración del cono (mm)	5.50	5.30	14.10	14.00	25.00	25.50	30.50	31.00
Penetración Promedio del cono (mm)	5.40		14.05		25.25		30.75	
Recipiente No:	1		2		3		4	
Peso Recipiente + Suelo húmedo (gr)	156.00		159.00		133.70		175.50	
Peso Recipiente + Suelo seco (gr)	128.00		126.60		108.00		132.20	
Peso Recipiente (gr)	50.00		46.00		51.90		46.00	
Peso suelo seco (gr)	78.00		80.60		56.10		86.20	
Peso de agua (gr)	28.00		32.40		25.70		43.30	
Contenido de humedad (%)	35.897		40.199		45.811		50.232	
Penetración (mm)	20							
Límite Líquido (LL)	46.10							

- Límite Plástico (LP).

LIMITE PLÁSTICO (LP)			
Prueba No:	1	2	3
Recipiente No.:	1	2	3
Peso Recipiente + Suelo húmedo (gr)	59.50	80.60	57.30
Peso Recipiente + Suelo seco (gr)	58.30	79.39	56.10
Peso Recipiente (gr)	52.50	73.40	50.50
Peso suelo seco (gr)	5.80	5.99	5.60
Peso de agua (gr)	1.20	1.21	1.20
Contenido de humedad (%)	20.690	20.200	21.429
Límite Plástico (LP)	20.77		

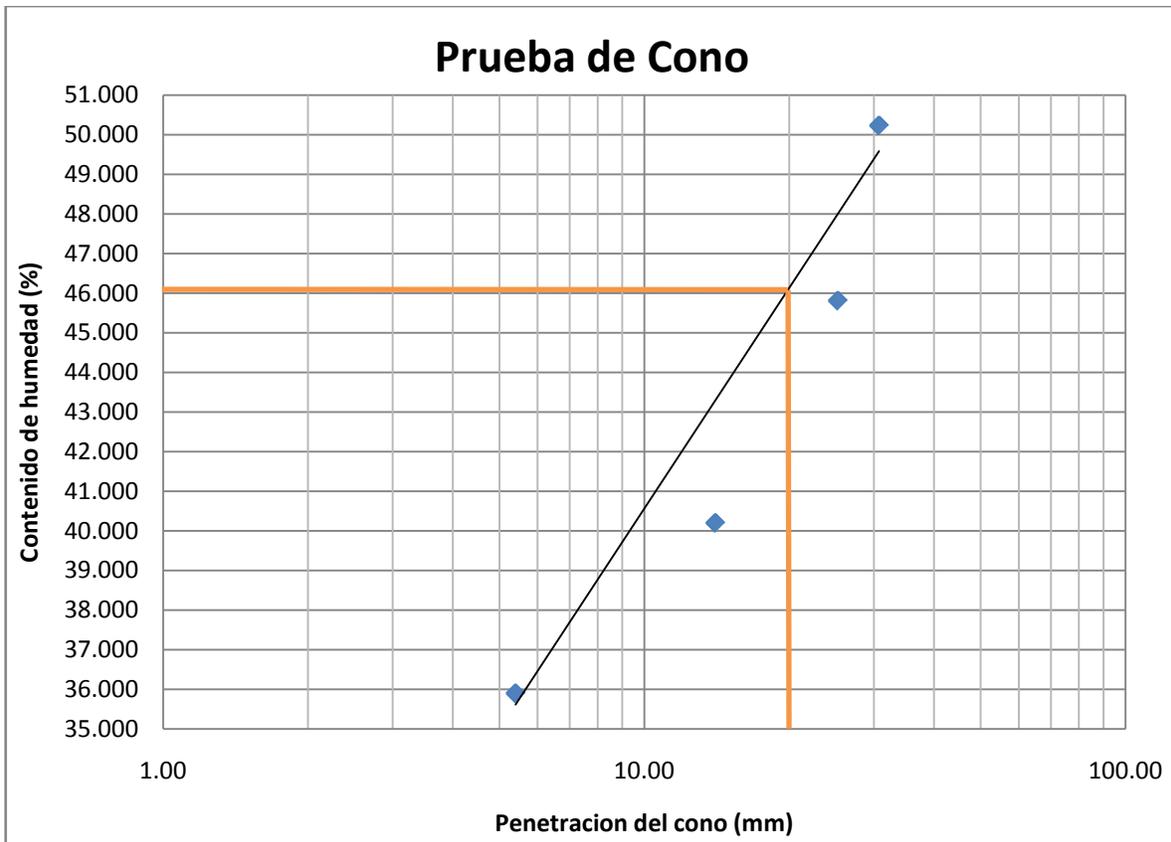


Figura 10. Grafica para determinar el Límite Líquido del suelo-cemento.

- Índice de Plasticidad (IP).

ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP)	
Límite Líquido (LL)	46.10
Límite Plástico (LP)	20.77
Índice de Plasticidad (LL - LP)	25.33

- Límite de Contracción Lineal (C.L).

Contracción Lineal (CL)				
Muestra	Li (cm)	Lf (cm)	Li - Lf (cm)	CL (%)
1	10.290	10.100	0.190	1.846
2	9.860	9.720	0.140	1.420
Promedio				1.633

- Límite de Contracción Volumétrica (L_C).

LÍMITE DE CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA (L_C)	
Petri No:	1
Peso Petri + Suelo húmedo (gr)	49.80
Peso Petri + Suelo seco (gr)	41.20
Peso Petri (gr)	20.10
Peso suelo seco (gr)	21.10
Peso de agua (gr)	8.60
Contenido de humedad (%)	40.758
Peso Volumétrico del Hg (gr/cm^3)	13.530
Peso Petri + Hg (gr)	252.50
Volumen del Petri (cm^3)	17.18
Peso Capsula Porcelana Grande (gr)	954.50
Peso Petri vidrio + Hg + Capsula de Porcelana Grande (gr)	1207.00
Peso Capsula de Porcelana Grande + Hg (gr)	1105.90
Peso de Hg desalojado (gr)	151.40
Volumen final del suelo (cm^3)	11.190
Límite de Contracción Volumétrica (L_C)	12.385

- Peso Específico Seco Máximo y Contenido de Agua Óptima (Prueba Proctor Estándar).

Datos	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Peso Molde + Base (Kg)	3.677	3.677	3.677	3.677	3.677
Peso Molde + Base + Suelo húmedo (Kg)	5.179	5.356	5.522	5.417	5.372
Peso Suelo (Kg)	1.502	1.679	1.845	1.740	1.695
Volumen Molde (m^3)	0.0009329	0.0009329	0.0009329	0.0009329	0.0009329
Peso Porcelana (Kg)	0.0474	0.0453	0.0504	0.0698	0.0428
Peso Porcelana + Suelo húmedo (Kg)	0.1663	0.1669	0.1685	0.2394	0.1657
Peso Porcelana + Suelo seco (Kg)	0.1523	0.1487	0.1459	0.1999	0.1354
Contenido de humedad (%)	13.35	17.60	23.66	30.36	32.72

Muestra	Contenido de humedad (%)	γ_m (Kg/m ³)	γ_d (Kg/m ³)	γ_{zva} (Kg/m ³)
1	13.35	1610.07	1420.49	1611.94
2	17.60	1977.74	1530.42	1561.60
3	23.66	1977.74	1599.28	1514.30
4	30.36	1865.19	1430.78	1469.79
5	32.72	1816.95	1369.00	1407.72

Datos a Graficar		
γ_d (Kg/m ³)	W (%)	γ_{zva} (Kg/m ³)
1420.49	13.35	1611.94
1530.42	17.60	1561.60
1599.28	23.66	1514.30
1430.78	30.36	1469.79
1369.00	32.72	1407.72
γ_{dmax} (Kg/m ³)	1625.00	
W_{opt} (%)	23.70	
γ_m (Kg/m ³)	2010.13	

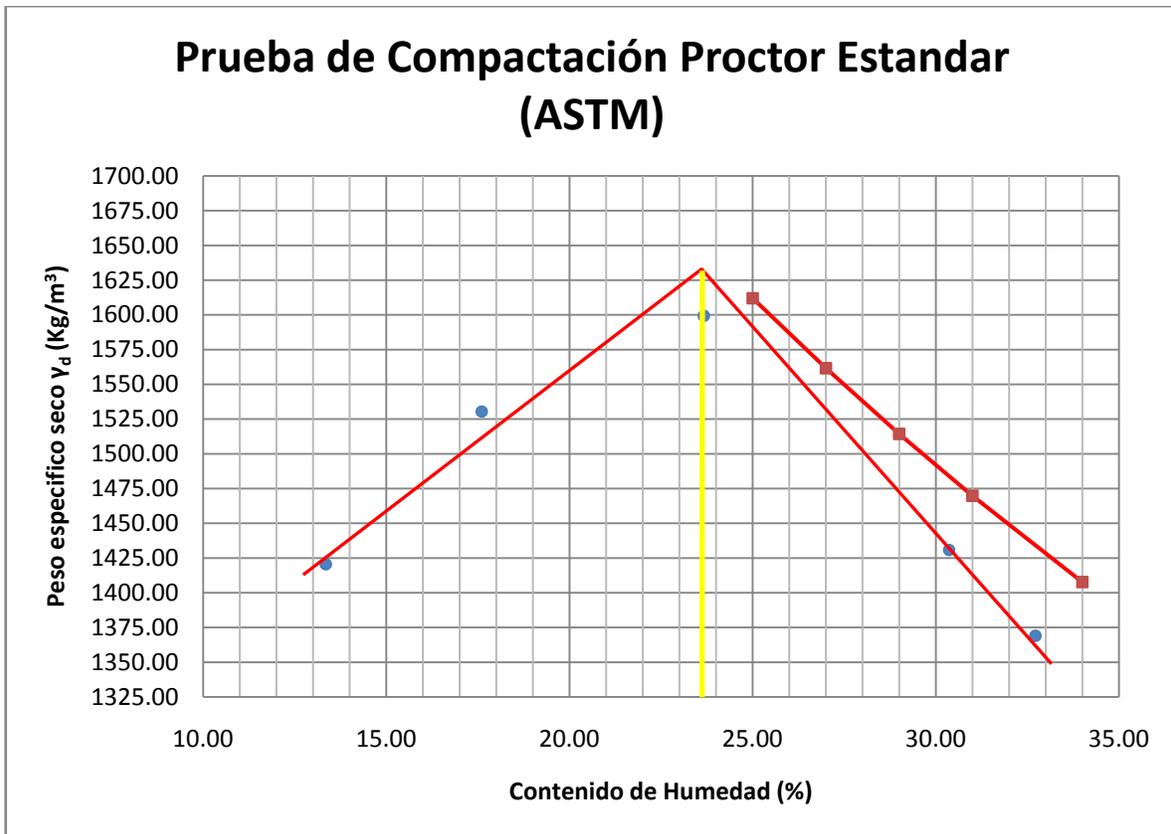


Figura 11. Grafica para determinar el contenido de humedad optima y el peso especifico seco máximo.

- Índice de Expansión (IE_{50}).

CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
Peso Capsula (gr)	50.00
Peso Capsula + Suelo húmedo (gr)	153.30
Peso Capsula + Suelo seco (gr)	140.40
Contenido de humedad (%)	14.27
DATOS DEL SUELO COMPACTADO EN ANILLO	
Altura del espécimen (cm)	2.54
Diámetro (cm)	10.18
Área (cm ²)	81.39
Volumen espécimen (cm ³)	206.74
S_s	2.70
Peso anillo (gr)	202.20
Peso anillo + Suelo (gr)	583.00
Peso Suelo (gr)	380.80

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE EXPANSIÓN	
Altura Inicial (cm)	0.000816
Altura Final (cm)	0.000852
Diferencia de Altura	0.000036
γ_d	1.61
S	57.08
IE_{med}	0.01
IE_{50}	2.84
Potencial de Expansión Muy bajo	

Índice de Expansión (IE)	Potencial de expansión
0 - 20	Muy bajo
21 - 50	Bajo
51 - 90	Mediano
91 - 130	Alto
> 130	Muy alto

- Resistencia a la Compresión Simple.

% de Cemento	# de Espécimen	Días de Curado	Resistencia a la Compresión σ (Kg/cm ²)	Peso Volumétrico γ_m (gr/cm ³)	Modulo de Elasticidad (Kg/cm ²)
12	1	2	8.760	2.065	500.000
12	2	2	9.385	2.236	625.000
12	1	7	25.028	2.025	2000.000
12	2	7	19.454	2.055	1111.111
12	1	28	57.223	2.102	1562.500
12	2	28	55.687	2.107	3035.714

12 % de Cemento					
2 Días de Curado					
Espécimen 1			Espécimen 2		
Diámetro (cm) =	7.125		Diámetro (cm) =	7.125	
Altura (cm) =	16.110		Altura (cm) =	15.995	
Peso (gr) =	1326.1		Peso (gr) =	1426	
Área de la Base (cm ²) =	39.871		Área de la Base (cm ²) =	39.871	
Volumen (cm ³) =	642.327		Volumen (cm ³) =	637.742	
γ_m (gr/cm ³) =	2.065		γ_m (gr/cm ³) =	2.236	
Carga Máxima (Kg) =	349.264		Carga Máxima (Kg) =	374.212	
σ (Kg/cm ²) =	8.760		σ (Kg/cm ²) =	9.385	

12 % de Cemento			
7 Días de Curado			
Especimen 1		Especimen 2	
Diámetro (cm) =	7.125	Diámetro (cm) =	7.125
Altura (cm) =	16.545	Altura (cm) =	16.940
Peso (gr) =	1336.0	Peso (gr) =	1388.2
Área de la Base (cm ²) =	39.871	Área de la Base (cm ²) =	39.871
Volumen (cm ³) =	659.671	Volumen (cm ³) =	675.420
γ_m (gr/cm ³) =	2.025	γ_m (gr/cm ³) =	2.055
Carga Máxima (Kg) =	997.898	Carga Máxima (Kg) =	775.639
σ (Kg/cm ²) =	25.028	σ (Kg/cm ²) =	19.454

28 Días de Curado			
12 % de Cemento			
Especimen 1		Especimen 2	
Diámetro (cm) =	7.125	Diámetro (cm) =	7.125
Altura (cm) =	15.180	Altura (cm) =	15.100
Peso (gr) =	1272.2	Peso (gr) =	1268.7
Área de la Base (cm ²) =	39.871	Área de la Base (cm ²) =	39.871
Volumen (cm ³) =	605.247	Volumen (cm ³) =	602.057
γ_m (gr/cm ³) =	2.102	γ_m (gr/cm ³) =	2.107
Carga Máxima (Kg) =	2281.558	Carga Máxima (Kg) =	2220.323
σ (Kg/cm ²) =	57.223	σ (Kg/cm ²) =	55.687

Graficas de los especímenes sometidos a la prueba de Resistencia a la Compresión Simple.

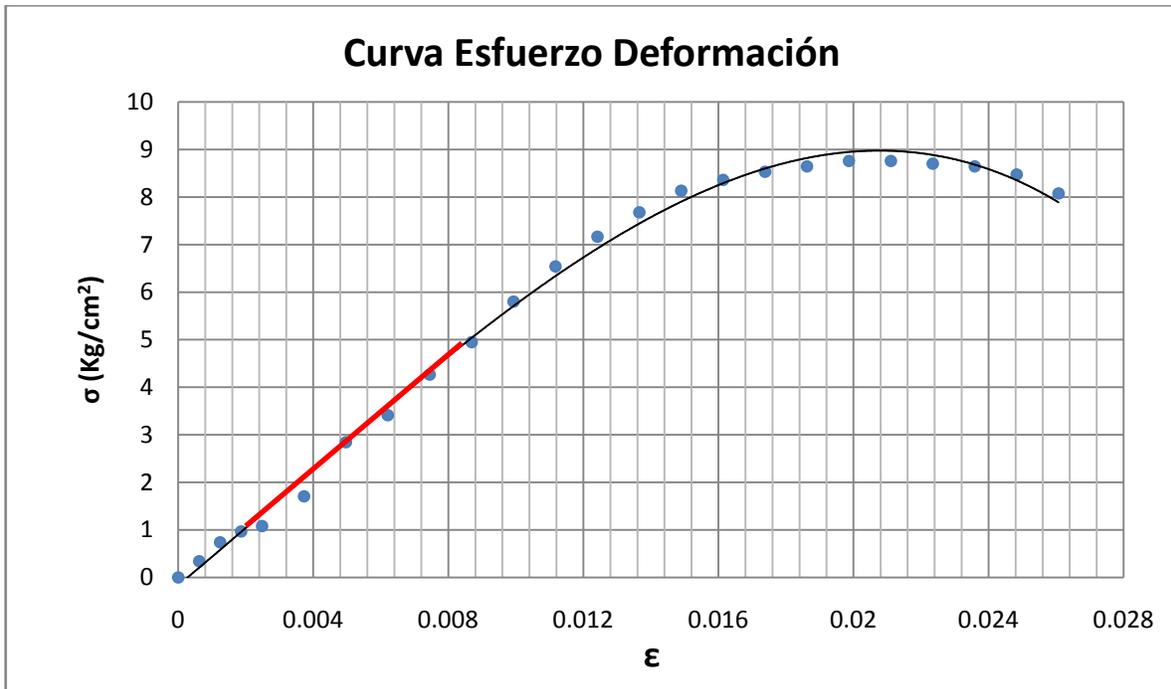


Figura 12. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 1 a los 2 días de curado.

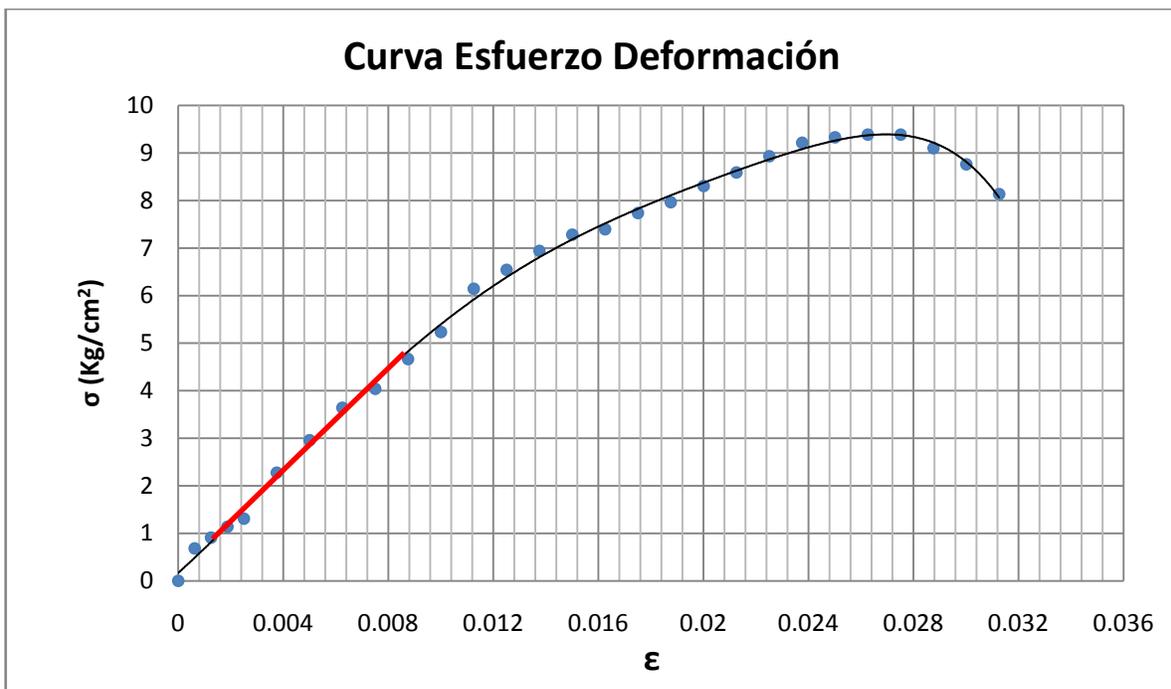


Figura 13. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 2 a los 2 días de curado.

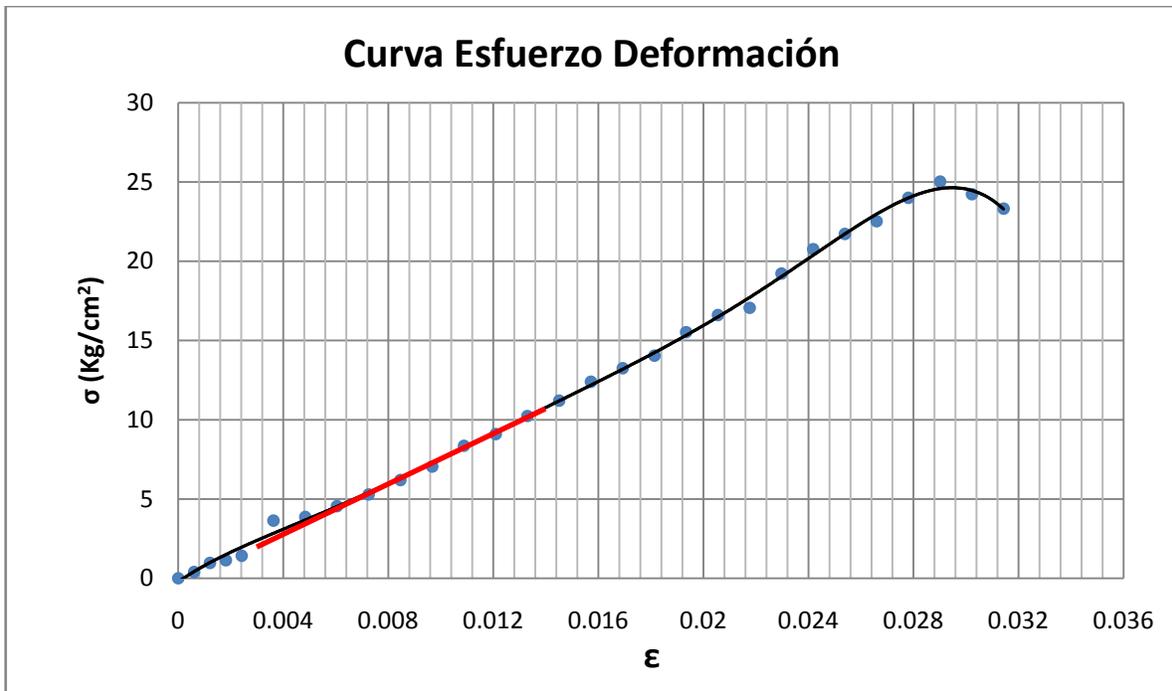


Figura 14. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 1 a los 7 días de curado.

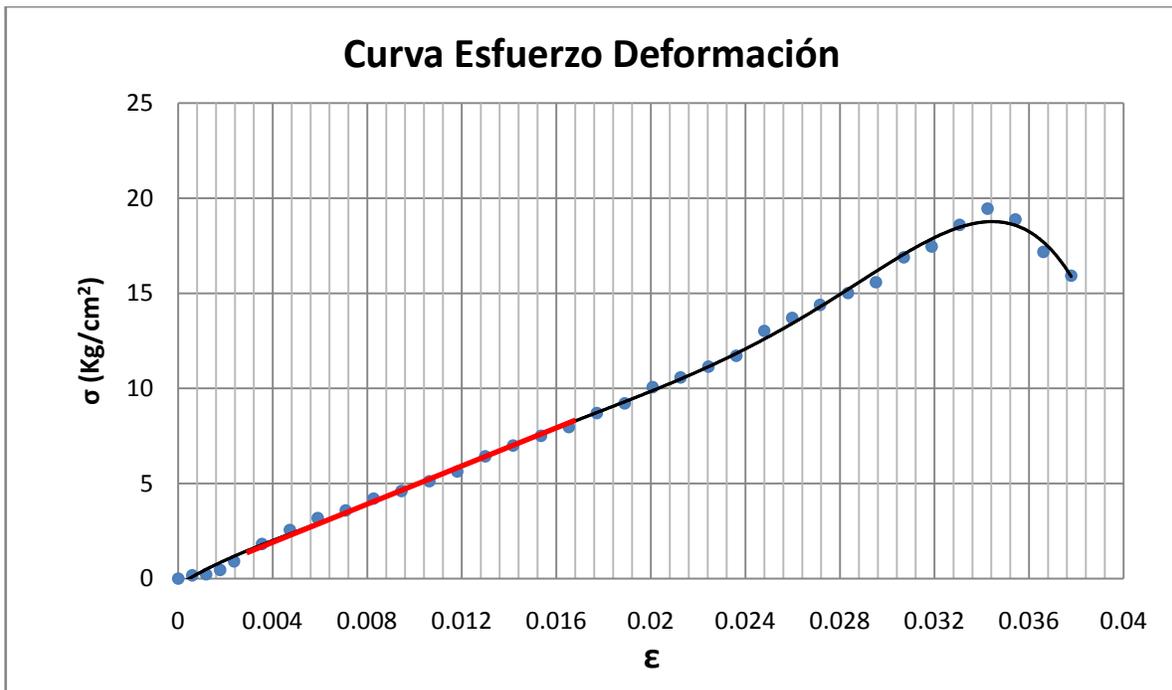


Figura 15. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 2 a los 7 días de curado.

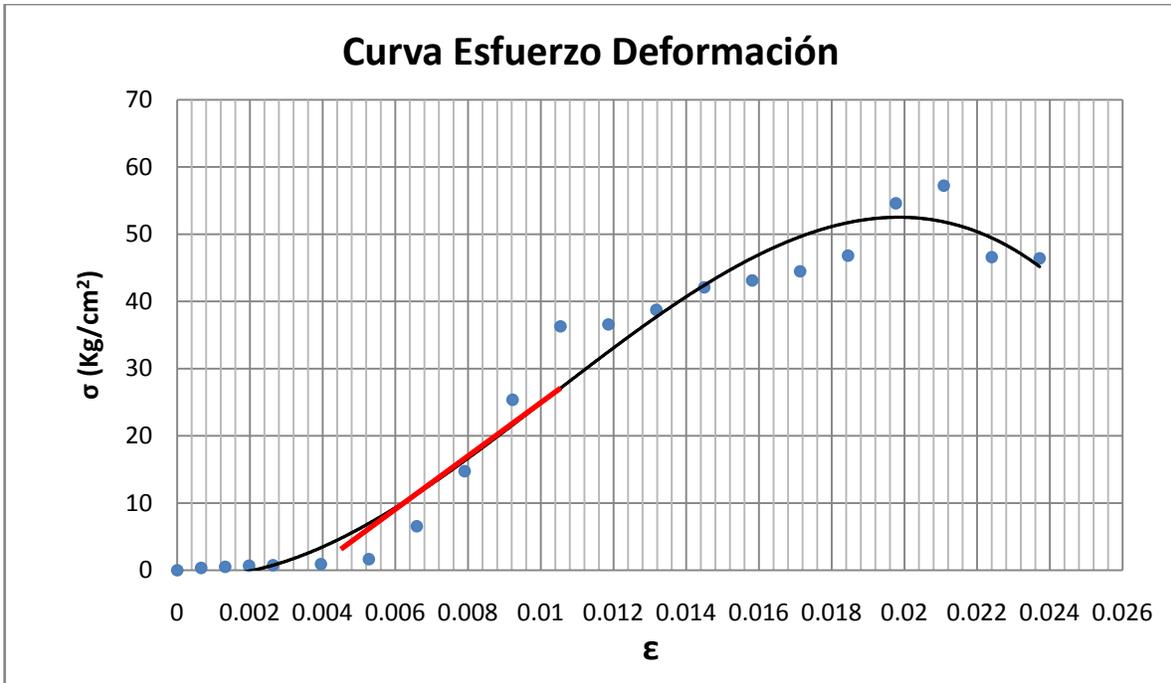


Figura 16. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 1 a los 28 días de curado.

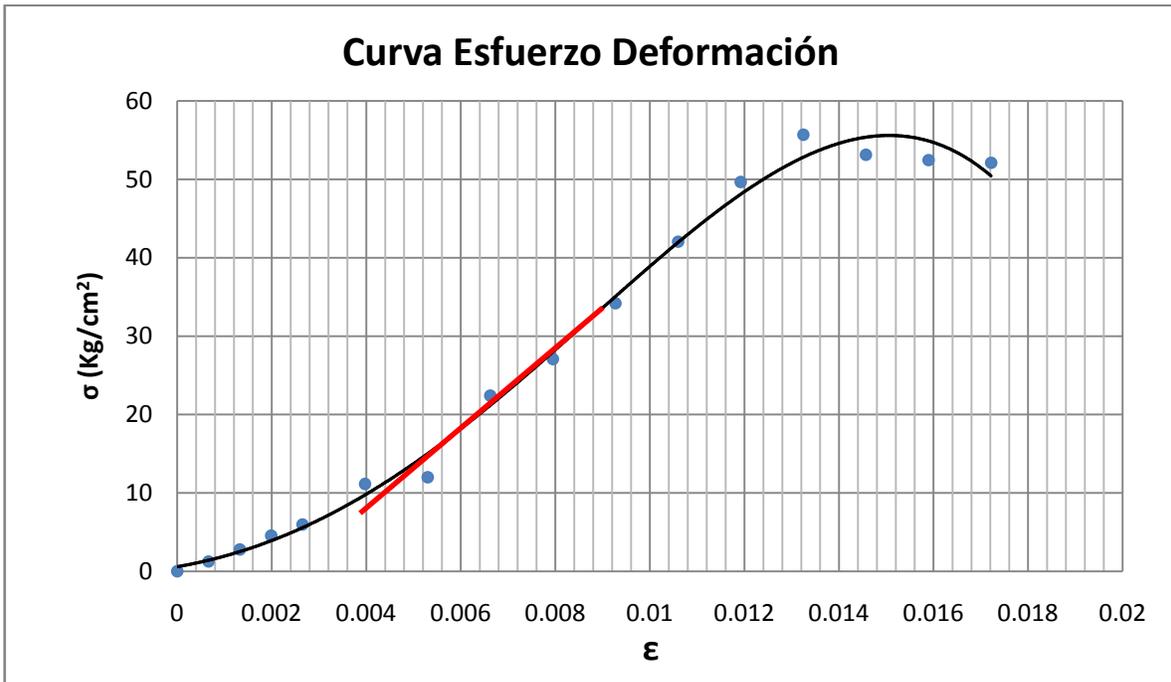


Figura 17. Grafica de la Curva Esfuerzo Deformación del espécimen 2 a los 28 días de curado.