Ciudad Obregón, Sonora, a 28 de Noviembre de 2011.

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

El que suscribe **Carlos Covarrubias Quijada**, 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: **"Aplicación del método de estabilización con cemento de la Asociación de Cemento Portland (PCA) a un suelo granular del fraccionamiento Puente Real. Ciudad Obregón, Sonora"**, 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.

Carlos Covarrubias Q.

Carlos Covarrubias Quijada
(Nombre y firma del autor)

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA
Educar para Trascender

"APLICACIÓN DEL METODO DE ESTABILIZACION CON CEMENTO DE LA ASOSIACION DE CEMENTO PORTLAND (P.C.A.) A UN SUELO GRANULAR DEL FRACCIONAMIENTO PUENTE REAL. CD. OBREGON SONORA"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTAN:

CARLOS COVARRUBIAS QUIJADA

ESTEBAN E. BOJORQUEZ GUERRERO

CD. OBREGON, SONORA DICIEMBRE DE 2011

AGRADECIMIENTOS

A MIS PADRES: Por darme la oportunidad de salir adelante con su apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida, inculcándome los valores más importantes. Les estaré eternamente agradecido por el gran sacrificio que hicieron por mí.

A MI FAMILIA: Por estar conmigo apoyándome en todas las circunstancias y porque se sienten orgullosos de mi.

A MIS COMPAÑEROS: Por apoyarme en el transcurso de la carrera universitaria, compartiendo conocimientos y brindando su valiosa amistad.

A MIS ASESORES Y REVISORES: Ingeniero Luis Gerardo Herrera, Ingeniero Germán Ibarra Encinas e Ingeniero Raúl Gutiérrez ya que sin ningún compromiso aceptaron guiarme en la elaboración de este trabajo que es la llave para obtener mi título profesional, agradezco el tiempo y empeño que se tomaron al revisar o al ayudarme a realizar cada capítulo de este trabajo.

A MIS PROFESORES: A todos los profesores de la universidad que aportaron su apoyo, su tiempo y sus conocimientos para facilitar mi aprendizaje.

ESTEBAN EMMANUEL BOJORQUEZ GUERRERO

AGRADECIMIENTOS

A DIOS: porque gracias a él he hecho una meta más en mi vida, al irme guiando en el transcurso de mi vida, al mantenerme con salud para seguir adelante.

A MI FAMILIA: Por seguir conmigo en una meta mas de mi vida, que me han brindado todo su apoyo en lo profesional, personal y espiritualmente; y sobre todo por confiar en mí.

A MI MADRE: Por ser una persona tan importante en mi vida, porque nunca se dejo vencer ante los problemas, siempre busco la manera de sacarme adelante y guiarme por el mejor camino y sobre todo por todo el amor que me ha dado. GRACIAS MAMA.

A MI HERMANA: Por el cariño y apoyo moral que siempre he recibido de ti y con el cual he logrado culminar mi esfuerzo, terminando así mi carrera profesional, que es para mí la mejor prueba de cariño.

A MI NOVIA: A quien jamás encontraré la forma de agradecer su apoyo, comprensión y confianza esperando que comprendas que mis logros son también tuyos e inspirados en ti, hago de este un triunfo y quiero compartirlo por siempre contigo.

A MIS MAESTROS: Luis Gerardo Herrera, Germán Ibarra y Raúl Gutiérrez por dedicar su tiempo en la revisión de mi tesis, por brindarme conocimiento y sobre todo por la manera tan amable en la que me asesoraron.

A MIS AMIGOS: Por estar conmigo en las buenas y en las malas, por confiar en mí y por demostrarme que puedo contar con ellos siempre.

CARLOS COVARRUBIAS QUIJADA

Índice General

No. Pagina

RESUMEN.

CAPITULO I. INTRODUCCION.

1.1. Antecedentes. **1**

1.2. Planteamiento del problema. **5**

1.3. Objetivos. **6**

1.4. Justificación. **6**

1.5 Limitaciones de estudio. **7**

CAPITULO II. MARCO TEORICO.

2.1. Generalidades. **8**

2.2. Uso de suelo-cemento en obras civiles. **9**

2.3 Suelo-cemento. **10**

2.3.1. Ventajas y Desventajas. **12**

2.3.2. Características generales. **14**

2.3.3. Relación agua-cemento. **14**

2.3.4. Compactación de la mezcla. **14**

2.3.5. Curado de la mezcla. **15**

2.3.6. Propiedades. **16**

2.4. Capas de un pavimento. **20**

2.5. Estabilización de suelos. **21**

2.6. Otras mezclas para estabilizar el suelo. **22**

2.7. Comparación entre las diferentes mezclas de estabilización de suelos **24**

CAPITULO III. METODOLOGIA.

3.1. Experimentación. **27**

3.2. Selección del lugar y Muestreo del suelo. **27**

3.3. Clasificación e identificación del suelo de estudio. **29**

3.4. Determinación de la dosificación adecuada de cemento Pórtland mediante el método detallado propuesto por la Portland Cement Association (PCA.) **31**

3.4.1. Selección de los porcentajes de cemento Portland para la preparación de los especímenes de prueba. **33**

3.4.2. Determinación del contenido optimo de agua para los especímenes de suelo-cemento mediante la prueba Proctor estándar. **33**

3.4.3. Método estándar de ensayo para humedecimiento y secado de mezclas de cemento compactado con suelo. **36**

3.4.4. Método estándar de ensayo para la resistencia a la compresión simple de cilindros moldeados de suelo cemento. **41**

CAPITULO IV. RESULTADOS.

4.1. Clasificación e identificación del suelo en estudio. **44**

4.2. Determinación de la dosificación adecuada de cemento Pórtland mediante el método detallado propuesto por la PCA. **46**

4.2.1. Determinación del contenido optimo de agua para los especímenes de suelo-cemento mediante la prueba proctor estándar. **46**

4.2.2. Determinación del porcentaje de pérdidas debido al humedecimiento secado de mezclas de suelo-cemento compactado. **47**

4.2.3. Determinación de la resistencia a la compresión simple de cilindros de suelo-cemento. **49**

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones **52**

5.2. Recomendaciones. **53**

Apéndice A **55**

Apéndice B **60**

BIBLIOGRAFIA. **80**

Resumen

De acuerdo con la Portland Cement Association (PCA), se estudió el uso del cemento portland como agente estabilizador de un suelo de grano grueso, para determinar la dosificación más adecuada a usar en la construcción de alguna obra de tierra, verificando su durabilidad y resistencia para diferentes porcentajes de cemento.

Se estudió a un suelo grueso proveniente de un banco de materiales que se extrajo de un fraccionamiento en construcción llamado “Puente Real” en Ciudad Obregón, Sonora. Se tomó suficiente suelo representativo para hacer las pruebas necesarias.

Las pruebas se hicieron en el laboratorio LV-800 de ingeniería civil del Instituto Tecnológico de Sonora, utilizando el equipo necesario para realizar cada una de ellas siguiendo el procedimiento indicado por la Portland Cement Association (PCA).

Se usó al cemento Pórtland marca campana como estabilizador de suelo, aplicando porcentajes de cemento en peso para la elaboración de cada uno de los especímenes, dependiendo de la granulometría del suelo, y de sus límites de consistencia. Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) se obtuvo una clasificación de suelo arenoso (SW), con plasticidad inapreciable, y un límite líquido de 28%, por lo tanto las dosificaciones recomendables para realizar las pruebas fueron de 3%, 4%, 5% y 7% de cemento Portland en peso.

En la elaboración de los especímenes se le incorporó la humedad óptima, para determinarla fue necesario realizar la prueba de compactación proctor estándar, en

nuestro caso debido a la granulometría, se empleó el método C, con un molde proctor de 6 pulgadas de diámetro, la humedad óptima resultante fue de 7.3%.

Posteriormente, se realizaron a los especímenes, las pruebas de durabilidad y resistencia, en cuanto a la durabilidad se realizó una prueba llamada "humedecimiento-secado", en la cual resultó que las dosificaciones de 4%,5%, y 7% cumplieron con las pérdidas máximas requeridas por la Pórtland Cement Association (PCA); en cuanto a la prueba de resistencia de compresión simple se obtuvo que los especímenes con porcentaje de cemento mayor o igual a 5% tienen la mínima resistencia requerida, por lo que la dosificación más adecuada para este tipo de suelo fue de 5% de cemento Portland, ya que cumplió tanto con los requisitos de durabilidad como de resistencia.

I. INTRODUCCION

1.1. Antecedentes

Los ingenieros de suelos han considerado durante muchos años al cemento Portland como uno de los materiales más indicados en la estabilización de suelos. La utilización del cemento, como estabilizante, se ha intensificado en los últimos años, sobre todo en la construcción de aeropistas y carreteras.

Se define al suelo-cemento como un material elaborado a partir de una mezcla de suelos finos y/o granulares, cemento y agua, la cual se compacta y se cura para formar un material endurecido con propiedades mecánicas específicas. El contenido de cemento en peso suele ser del orden del 3 al 7% en peso de materiales secos y a largo plazo, su resistencia a compresión suele ser superior a 20 Kg/cm^2 (4 MPa). El contenido de agua se elige para obtener mezclas de consistencia seca que permitan su compactación con rodillo. El suelo-cemento se usa

normalmente como capa de apoyo de otros materiales tratados con cemento o de concreto hidráulico o bien como capa resistente, bajo capas bituminosas.

El hombre ha usado tanto la cal como diversos aglomerantes puzolánicos en la estabilización de suelos cohesivos. En civilizaciones como la Inca o la azteca los caminos estabilizados fueron clave para el desarrollo de diversas actividades. Ya en el siglo XX se lograron avances en la producción de conglomerantes en el desarrollo de equipos de construcción y técnicas de ejecución. Con el tiempo, se crearon las condiciones óptimas para la realización de muchos experimentos en mezclas de suelo y cemento que mostraron las posibilidades de aprovechamiento de los suelos existentes, modificados en mayor o menor grado por la mezcla de los mismos con cemento Portland y agua y su posterior compactación.

La aplicación del suelo-cemento empezó a estudiarse metódicamente entre 1910 y 1920. En Inglaterra, en 1917, Brooke Bradley empleó con éxito una mezcla de cemento con suelos arcillosos en la construcción de carreteras. Sin embargo, a pesar de los excelentes resultados, la técnica no fue usada posteriormente. En los Estados Unidos, el uso del suelo - cemento se incrementó a partir de la patente de Joseph Hay Amies en 1917, de una mezcla de suelo con cemento llamada Soilamies. El esfuerzo conjunto de la Portland Cement Association (PCA), el Bureau of Public Roads y el Highway Department del estado de Carolina del Sur contribuyó al desarrollo tecnológico de la estabilización de suelos con cemento, realizando diversos tramos experimentales de carreteras entre 1930 y 1940.

Después de la Segunda Guerra Mundial se inician en España y Latinoamérica las primeras experiencias con suelo-cemento aplicado en carreteras, siendo Argentina, Colombia y El Salvador ejemplos de países con más de 50 años de experiencia en la construcción de caminos de este tipo.

En la actualidad existen modernos equipos estabilizadores, recicladores de gran potencia y rendimiento, distribuidores y dosificadores de cemento que facilitan el trabajo en campo y garantizan la calidad de mezclado y colocación. Aún existen retos por superar referente al conocimiento de este material, si bien el trabajo de investigación continúa en diversos países.

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

- Bases de carreteras, calles, aeropuertos y estacionamientos
- Ampliaciones, acotamientos y taludes de carreteras
- Reconstrucción de bases falladas
- Protección contra el efecto de bombeo en bases y carpetas de rodamiento
- Protección de terraplenes contra la lluvia
- Estabilización de taludes
- Construcción de accesos para los puentes
- Sub-bases para pavimentos rígidos
- Sub-bases para pavimentos flexibles
- Carpetas para carreteras de poco trafico

La estabilización de los suelos aumenta enormemente la potencialidad de uso de los bancos de materiales. Esto se debe a que una buena parte de los materiales de los bancos, que en un proyecto convencional se desecharían como deficientes por no satisfacer los requerimientos de diseño, se pueden utilizar mediante un tratamiento adecuado. Con el tratamiento se mejoran las características físicas para que puedan

ser aprovechadas. El tratamiento con cemento es uno de los que, con más amplio campo de acción, han dado resultados muy satisfactorios y mayores posibilidades de uso.

En nuestro país el tratamiento de suelos seguramente puede proporcionar una de las soluciones más apropiadas para la obtención de materiales de construcción en la zona costera del golfo de México, donde en amplias partes los bancos de roca, grava y arena son en general escasos y se presentan problemas para poder satisfacer las crecientes necesidades de construcción de calles, carreteras, ferrocarriles, puertos, presas y aeropuertos.

Existen diversas razones que actualmente determinan un mayor uso del suelo-cemento en la construcción de estructuras de pavimentos. Tanto consultores como entidades encargadas de la administración vial coinciden en que la demanda de un transporte de calidad requiere una mayor durabilidad de los materiales, estructuras de pavimentos y sub-rasantes. Para lograr la misma, es indispensable contar con estructuras de pavimento con capas de elevada capacidad de soporte y resistentes a los agentes atmosféricos. Otra razón para usar suelo-cemento en carreteras es el aspecto de protección del medio ambiente, el cual cada vez impone mayores limitaciones para la búsqueda y explotación de bancos de materiales, práctica por muchos años utilizada.

Finalmente, la posibilidad de reducir espesores de capas que conforman la estructura del pavimento sin disminuir la capacidad estructural de la misma, es uno de los logros que pueden obtenerse de las características que tiene el suelo-cemento, debido a su relativamente elevado módulo de elasticidad. Esto se traduce en ahorros de materiales y aumento en los rendimientos de construcción.

En la región el uso del suelo-cemento ha sido muy bajo, hay poca experiencia en su uso, se sabe del empleo con éxito en la reconstrucción de algunos tramos en la carretera internacional México 15 en el estado de Sonora.

1.2. Planteamiento del problema

En la región del valle del yaqui, se pueden encontrar en bancos de materiales, suelos de grano gruesos de baja calidad o pobres, que no cumplen especificaciones de calidad, para usarse en alguna estructura de tierra de una obra civil.

En base a el procedimiento establecido por la P.C.A (Portland Cement Association), el cual indica realizar pruebas de compactación, resistencia a la compresión simple, de mojado y secado a mezclas de suelo-cemento con diferentes porcentajes de cemento portland, se pretende encontrar la mezcla adecuada de cemento portland con un suelo de grano grueso típico de la región, para mejorar su resistencia, durabilidad y algunos otros parámetros que afecten en la construcción de estructuras de tierra.

¿Cuál será la dosificación óptima, siguiendo los requerimientos de la P.C.A, para que un suelo granular pueda ser utilizado en alguna estructura de tierra?

Se propone la siguiente Hipótesis:

“Un suelo granular proveniente de un banco de materiales ubicado en el kilómetro 18+000 de la carretera federal México 15, tramo: Ciudad Obregón – Guaymas, mejora sus propiedades mecánicas al incorporar una dosificación adecuado de cemento Portland de acuerdo con los requerimientos de la Portland Cement Association (PCA)”.

1.3. Objetivos

Objetivo general:

Determinar la dosificación adecuada de cemento Portland para un suelo granular típico de la región, proveniente de un banco de materiales, para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas mediante el método de la Portland Cement Association (PCA).

Objetivos específicos:

- Aplicar una metodología para estabilizar un suelo granular mediante el uso de cemento portland.
- Mejorar la resistencia y durabilidad del suelo granular a base de una mezcla con cemento Portland, para incrementar la potencialidad del uso de suelos de banco que no cumplen especificaciones de proyecto.
- Seleccionar la dosificación adecuada de cemento Pórtland.

1.4. Justificación

El suelo granular en muchas ocasiones no cumple estrictamente especificaciones de proyecto. Por esta razón el uso de cemento sería ideal para mejorar las propiedades mecánicas del suelo.

En proyectos en los que obtener grandes cantidades de suelo granular de buena calidad no sea económicamente viable, aplicar cemento puede reducir considerablemente los espesores de las capas de terracerías.

En obras de importancia donde se requieran las especificaciones más estrictas en cuanto a resistencia y durabilidad, el uso de suelo-cemento es una buena alternativa para conseguir estos fines.

Hay algunas desventajas en el uso del suelo-cemento, como puede ser el aumento del costo, mayor supervisión y control; Sin embargo, tiene ventajas que ameritan el uso del cemento cuando la importancia de la obra lo requiere, principalmente mayor resistencia y durabilidad.

Al hacer estos estudios estaremos beneficiando a los ingenieros civiles, constructores, y a la sociedad en general, ya que se comprueba una alternativa para los suelos granulares, evitando problemas en las estructuras de tierras, como agrietamiento de capas del pavimento y poca durabilidad.

1.5. Limitaciones del estudio

El estudio se limita a suelo de tipo granular de la región proveniente de un banco de materiales antes mencionado.

La estabilización de suelo-cemento se logra haciendo uso de la metodología establecida en el manual de la PCA, y con el equipo disponible para realizar las pruebas en el laboratorio LV-800 de ingeniería civil del Instituto tecnológico de sonora. No se realiza la prueba de congelación debido a que en muchas ocasiones en la región no es necesario, esto es porque las temperaturas locales rara vez llegan a puntos de congelación.

II. MARCO TEORICO

2.1 Generalidades

Es de todos conocida la variabilidad y complejidad de los suelos. Sin embargo debido a sus diversos usos, el ingeniero tiene grandes oportunidades para desarrollar sus conocimientos, al utilizar a los suelos como un material ingenieril.

A medida que el tiempo pasa, cualquier tipo de obra civil requiere de nuevos materiales y técnicas para satisfacer sus incesantes requerimientos de construcción.

Uno de estos materiales que se ha utilizado mucho en la actualidad es el producto endurecido de la mezcla compactada suelo con cemento y agua, llamado suelo-cemento.

Las principales razones de la aplicación de los tratamientos con cemento a los suelos consisten, en el hecho de que los suelos constituyen una inagotable fuente de materiales de construcción que se tienen a la mano y son un recurso renovable, evidentemente también son los más baratos y expeditos para usar. (Fernández, 1982).

2.2 Uso de suelo-cemento en obras civiles

A) Internacional

En Alemania, se ha empleado el suelo-cemento en la construcción de carreteras, en los Estados Unidos el uso del suelo-cemento se ha aplicado en todo tipo de obras, miles de kilómetros de carretera, así como en la construcción de presas importantes como la presa Bonny (colorado) y la presa Cahuilla en el sur de california; por otra parte para la protección longitudinal de 1800 metros del rio San Laurence, en la península de Quebec, Canadá, y también para proteger las costas de esta.

En Latinoamerica también se ha empleado este método; por ejemplo, en El Salvador, el 95% de los caminos rurales pavimentados tiene base de suelo-cemento y en los últimos 10 años, el 100% de nuevas vías urbanas e interurbanas y pisos industriales tienen bases de suelo-cemento.

B) Nacional

A nivel nacional hay mucho que desear, a comparación de otros países industrializados, no se ha explotado el suelo-cemento.

En la presa “La Manzanilla” y la “Trigomil” en Jalisco, se empleó al cemento como estabilizador de suelo. En la presa “Josefa Ortiz de Dominguez” en Sinaloa se uso el cemento en los taludes del canal de salida de la obra de toma, aguas arriba.

C) Regional

En el estado de Sonora, se informa del uso del suelo-cemento en la capa de bases en la reconstrucción de algunos tramos de la carretera México 15 desde 1980, en las carreteras estatales no se ha usado el cemento en las bases, solo en la capa subrasante se ha estabilizado con cal.

2.3 Suelo-cemento

En el intento de dar una definición satisfactoria se han formulado las más variadas definiciones. La más corriente es la de la Portland Cement Association (PCA).

“El suelo-cemento es una mezcla intima 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, 1995).

A) 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 se ha endurecido la mezcla de cemento con agua. (Fernández, 1982)

B) Suelo

En el sentido general de la ingeniería, suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con el líquido y gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas. (Braja, 2001)

En teoría cualquier suelo puede estabilizarse con cemento, a excepción de los suelos con bastante contenido tanto de sales que afecten al cemento como de substancia orgánica o materiales deletéreos, pero es ampliamente recomendado su uso en suelos granulares, ya que en suelos plásticos requiere grandes cantidades de cemento para que tenga un comportamiento favorable.

C) 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 varia 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 este 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, la manejabilidad de la mezcla, la necesidad de evitar los agrietamientos excesivos y para alcanzar la compactación más adecuada con el equipo disponible. (De la Fuente, 1995)

2.3.1 Ventajas y Desventajas

A) Principales ventajas de suelo-cemento

La estabilización de los suelos aumenta enormemente la potencialidad de uso de los bancos de materiales. Esto se debe a que una buena parte de los materiales de los bancos, que en un proyecto convencional se desecharían como deficientes por no satisfacer los requerimientos de diseño, se pueden utilizar mediante un tratamiento adecuado. Con el tratamiento se mejorarán las características físicas para que puedan ser aprovechados. El tratamiento con cemento es uno de los que, con más amplio campo de acción, han dado resultados muy satisfactorios y mayores posibilidades de uso.

Algunas veces, donde los bancos convencionales están muy alejados y resulta incosteable o muy costosa su explotación, cabe la posibilidad de utilizar económicamente los bancos cercanos mediante tratamientos. Siempre y cuando el

costo de estos compita con los costos adicionales, esto es, aquellos que se generan debido a la lejanía de los bancos que no requieren tratamiento.

La base de suelo-cemento ya colocada y endurecida es bastante más rígida que las bases usuales en gravas, lo que le permite transmitir mejor las presiones de las llantas a la sub-base. Por presentar mayor rigidez es posible reducir el espesor requerido de los pavimentos tratados para transmitir las presiones aceptables en las capas inferiores. (De la Fuente, 1995)

B) Principales desventajas de suelo-cemento

-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.

-Es necesario agilizar y realizar un mayor y mejor control de la construcción en obra que el que se hace utilizando métodos normales.

-La liga entre diferentes capas es dificultosa.

-Se deben aplicar técnicas en general poco conocidas en México, si bien no difíciles de adquirir y ya bastante probadas en otros países.

-Necesidad de realizar cuidados preventivos para el personal por el daño que puede provocar el constante tocar o aspirar el polvo del cemento.

2.3.2 Características generales

A) Color y textura

En general, se observaran pocos cambios de color y textura con respecto a las que presenta el suelo original. (De la Fuente, 1995)

B) Estructura

En suelos granulares se presenta una estructura similar a la del suelo que la compone; exceptuando los hechos de que se forman nuevos vínculos entre sus gránulos y que las partículas de cemento rellenan los huecos entre ellos. (De la Fuente, 1995)

2.3.3 Relación agua-cemento

La relación agua-cemento apropiada difiere en su obtención de la del concreto convencional. La cantidad de agua apropiada depende más de la elaboración y trabajabilidad que se desee obtener en la mezcla, para aprovechar mejor los equipos de construcción disponibles. (De la Fuente, 1995)

2.3.4 Compactación de la mezcla

La compactación de la mezcla tiene efecto considerable en las propiedades ingenieriles del producto terminado. La compactación aumenta de 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 cambiará 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 ineficaz al tratamiento, ya que destruirá y afectará los vínculos establecidos inicialmente entre las partículas.

Es importante observar que la durabilidad y resistencia de un suelo compactado cerca del punto óptimo de humedad decrecen considerablemente después de un retardo de dos horas del inicio de la compactación, a partir del comienzo de la hidratación del cemento.

Por esta causa las especificaciones usuales solo permiten un tiempo no mayor de 2 horas para el lapso comprendido entre la adición del agua y la compactación final; aunque a veces se extienda a 6 horas bajo ciertas condiciones muy especiales. La compactación que se ha realizado bastante después de la hidratación se ha mostrado completamente ineficiente.

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. (De la Fuente, 1995)

2.3.5 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.

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. Por esta razón mejoran las resistencias en climas cálidos, pero también debe cuidarse el efecto de la alta temperatura durante las reacciones de fraguado. (De la Fuente, 1995)

2.3.6 Propiedades

A) Relación esfuerzo-deformación

Con respecto a la forma del comportamiento del suelo estabilizado, algunos estudios realizados muestran sus resultados con graficas que presentan una parte no lineal significativa de la curva esfuerzo deformación, para valores superiores al 80% de la carga de ruptura en mezclas con suelos granulares y 60 a 80% en mezclas con los suelos que contienen cantidades apreciables de finos. (De la Fuente, 1995)

Los suelos tratados presentan un comportamiento elástico lineal.

B) Resistencia a la compresión simple

La resistencia a la compresión simple varía principalmente con:

- El contenido y tipo de suelo usado. (Ver tabla II.1)
- La eficiencia lograda en el mezclado del cemento con el suelo;
- Las características y efectividad de los aditivos usados;
- El tipo y cantidad de materia orgánica, sales y materiales deletéreos existentes en el suelo;
- La cantidad y calidad del agua usada.

- El tiempo transcurrido después de realizados la humectación, mezclado y compactación de los materiales;
- El grado de compactación alcanzado.
- La duración y forma de hacer el curado.
- Las prevenciones tomadas para disminuir el agrietamiento. (De la Fuente, 1995)

Tabla II.1 Aumento en la resistencia a la compresión simple con el tiempo para varios tipos de suelos

TIPO DE SUELO	RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE. (kg/cm^2)	
	7 días	28 días
GRAVAS Y ARENAS (A-1, A-2, Y A-3)	21-42	28-70
SUELOS LIMOSOS (A-4 Y A-5)	17-35	21-63
SUELOS ARCILLOSOS (A-6 Y A-7)	14-28	18-42

Fuente: IMCYC

C) Modulo de elasticidad

El modulo de elasticidad estático es muy variable y depende del tipo de suelo y de la cantidad de cemento principalmente. En general, este modulo es bajo comparándolo

con el del concreto y muy alto si se le compara con el del suelo natural. (De la Fuente, 1995)

D) Fatiga

Desde hace mucho tiempo se ha observado que las piezas o materiales se rompen si son sometidos de manera repetitiva a un número considerable de solicitaciones, cuya amplitud final es menor que la resistencia a la ruptura obtenida con una única solicitación de carga y además que es función continua monótonamente decreciente de este número; a este fenómeno de disminución de capacidad se le llama fatiga.

Por otra parte el número de repeticiones de la carga que llega a causar la falla se relaciona con el radio de la curvatura de la parte de la capa tratada que se flexiona bajo una llanta cargada o bajo una placa de carga. (De la Fuente, 1995)

E) Agrietamiento

Es uno de los aspectos insatisfactorios del suelo-cemento ya que si se ignora y no se toman las debidas providencias puede reducir la vida útil de los pavimentos y causar diseños deficientes. Sin embargo, un diseño realizado por profesionistas expertos y prácticas correctas de construcción puede evitar casi todo el efecto nocivo.

El agrietamiento es una característica del suelo-cemento. Se puede observar en casi todas las construcciones de suelo-cemento la formación de grietas por contracción, relativamente poco espaciadas. Estas grietas finas se forman de tal manera que permiten una buena traba o entrelazamiento del material, lo que es suficiente en pavimentos para que se comporte en forma similar a una base de piedra triturada. (De la Fuente, 1995)

El agrietamiento en las capas estabilizadas con cemento se debe principalmente a:

- Cambios en la presión del agua intersticial dentro de la mezcla endurecida; que se producen por perdidas y variaciones en el contenido de agua libre existente en los poros
- Cambios en la estructura del suelo tratado (reorientación de las partículas durante el curado)
- La acción de las cargas impuestas por el trafico
- Las deformaciones de las capas inferiores del pavimento y del suelo de cimentación
- Cambios físico-químicos en las características de los componentes
- Cambios de temperatura

Medidas para reducir el agrietamiento en los pavimentos:

- Usar un suelo bien graduado con un mínimo de finos cohesivos
- El suelo de apoyo de subbase o terracerías no debe contener agregados mayores de una pulgada.
- Colocar una doble o triple capa bituminosa sobre el suelo-cemento.
- Proporcionar un buen espesor a la carpeta asfáltica.
- Colocar la superficie protectora lo más tarde que sea posible durante la construcción.
- Construcción de capas superficiales adicionales en etapas durante su vida útil.
- Dar un riego bituminoso a la base de suelo-cemento.
- Mantenimiento y reparación oportuna de los agrietamientos importantes.

2.4 Capas de un pavimento

A) Capa Subrasante

Es el terreno de cimentación del pavimento. Puede ser el suelo natural, debidamente recortado y compactado; o puede ser, debido a los requerimientos del diseño geométrico, cuando el suelo natural es deficiente, y el material seleccionado de relleno es de buena calidad. En todo caso, el material debera cumplir con las normas de calidad de la secretaría de comunicaciones y transportes. (Wright, 1999)

B) Capa Sub-Base

Es una capa de materiales pétreos, de buena graduación. Construida sobre la subrasante. Esta capa, al igual que la anterior, deberá cumplir con los requisitos de compactación y de calidad a que se hace referencia para la capa subrasante.

Esta capa es la que subyace a la capa base, cuando esta es necesaria, como es el caso de los pavimentos flexibles. (Wright, 1999)

C) Base

Constituye la capa intermedia entre la capa de rodamiento y la sub-base. Generalmente se la usa en los pavimentos flexibles. Se compone de materiales pétreos con buena distribución granulométrica. Esta capa permite reducir los espesores de carpeta, dada su función estructural importante al reducir los esfuerzos cortantes que se transmites a las capas inferiores. (Wright, 1999)

D) Carpeta

Superficie de rodamiento constituida por materiales endurecidos para pasar minimizados los esfuerzos hacia las terracerías. Pueden ser materiales granulares

con o sin liga o mas comúnmente de concreto asfáltico o hidráulico, en sus diferentes variantes. Constituye el área propiamente dicha por donde circulan los vehículos y peatones. (Wright, 1999)

2.5 Estabilización de suelos

En un sentido amplio se puede definir la estabilización de suelos como la combinación y manipulación de suelos, con o sin mezclas, para producir una masa firme, capaz de soportar el transito en todas las condiciones climatológicas. (Wright, 1999)

Enseguida se mencionan los tipos de estabilización de suelos

- Estabilización por métodos mecánicos, de los que la compactación es el mas conocido, pero entre los que las mezclas de suelos se utilizan también muy frecuentemente. (Wright, 1999)
- Estabilización por drenaje. (Wright, 1999)
- Estabilización por medio eléctricos, que la electroósmosis y la utilización de pilotes electro metálicos son probablemente los mejor conocidos. (Wright, 1999)
- Estabilización por empleo de calor y calcinación. (Wright, 1999)
- Estabilización por medios químicos, generalmente lograda por la adición de agentes estabilizantes específicos, como el cemento, la cal, el asfalto u otros. (Wright, 1999)

2.6 Otras mezclas para estabilizar el suelo

A) Asfalto

El mejoramiento de las propiedades de los suelos con el añadido de asfalto y productos asfálticos es una técnica socorrida y frecuentemente muy efectiva. Son tres los tipos de producto que se han usado para este fin:

- Productos bituminosos, que son sistemas anhidros de hidrocarburos totalmente solubles en bisulfuro de carbono.
- Productos asfálticos, procedentes de la destilación y refinamiento del petróleo o asfaltos naturales, mas raramente.
- Productos de residuo de la destilación destructiva de materiales orgánicos, tales como el carbón, ciertos aceites, lignitos, turbas y madera (alquitranes).

Siendo las emulsiones y los asfaltos rebajados los mas usados en estabilizaciones de suelos, pero se usan también alquitranes calentados o rebajados. El asfalto se usa frecuentemente en muchos países en la estabilización de arenas. (Wright, 1999)

B) Cloruro de calcio

Algunas veces se emplea en la elaboración de mezclas de suelo agregado con objeto de hacer expedito el proceso de compactación haciendo más lenta la velocidad de evaporación de la humedad de la mezcla durante la compactación. (Wright, 1999)

C) Cal

Se ha probado que la incorporación de pequeñas cantidades de cal hidratada es eficaz para el mejoramiento de ciertos suelos plásticos arcillosos. Se usa para reducir

la plasticidad, contracción y expansión de suelos arcillosos, al mismo tiempo que para incrementar la capacidad de carga de un suelo.

El uso de la cal tiene también ciertas ventajas desde el punto de vista del proceso de construcción para hacer los suelos plásticos más manejables. Tiende a impermeabilizar el suelo hasta cierto punto, lo cual permite que se seque mas rápidamente cuando se satura, permitiendo que la construcción sea mas rápida. (Wright, 1999)

D) Sal

La sal de roca se ha empleado con éxito en la estabilización de suelos para bases y superficies de rodamiento sobre las cuales circula un transito muy ligero. El procedimiento es muy similar al descrito por las mezclas que se utiliza el cloruro de calcio. En general, la cantidad de sal recomendada es de 1 a 2 libras por yarda cuadrada por pulgada de espesor de suelo suelto. (Wright, 1999)

E) Otros materiales

Se ha recibido información sobre el uso de lignina como material aglutinante que se obtiene como subproducto de la manufactura del papel a partir de madera por medio del proceso del sulfito y se ha construido una cantidad limitada de caminos utilizando este material. De manera similar se han empleado diferentes silicatos de sosa en forma experimental para mejorar ciertas clases de suelos arcillosos.

Experimentalmente, se ha utilizado un cierto numero de materiales impermeables resinosos, incluidos el stabinol y el vinisol; a ninguno de ellos se le ha dado gran uso. (Wright, 1999)

2.7 Comparación entre las diferentes mezclas de estabilización de suelos

Según el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) se dice que mediante pruebas de laboratorio y en experiencia se obtiene que el cemento tiene mayor adaptabilidad a suelos granulares, esto quiere decir que encaja perfectamente en el suelo que se estudia.

La cal por su parte tiene más efecto en abatir la plasticidad en los suelos plásticos; por su parte el cemento en suelos arcillosos y plásticos, se tiene que usar grandes cantidades de cemento para obtener resultados favorables por lo que no es la mejor opción en este tipo de suelo, a continuación se presenta una tabla útil para conocer las diferentes reacciones de los diferentes tipos de estabilización con los tipos de suelo. Ver tabla II.5 para observar las comparaciones de diferentes mezclas.

Tabla II.2 Respuesta a algunos minerales típicos a los diferentes métodos de estabilización

Mineral o componente del suelo típico	Estabilización recomendable	Finalidad
Materia Orgánica	Estabilización mecánica	Los demás métodos no son efectivos
Arenas	Mezcla con materiales finos no plásticos Cemento Asfalto	Para estabilidad mecánica Para incrementar resistencia Para adquirir cohesión
Limos	No responden a los métodos de estabilización en uso	----------
Alófanos	Cal o mezclas de cal y yeso	Para incrementar resistencia
Caolín	Arena Cemento Cal	Para estabilidad mecánica Para incrementar resistencia a corto plazo Para mejorar trabajabilidad y mejorar resistencia a largo plazo
Ilita	Cal Cemento	Para mejorar trabajabilidad y adquirir resistencia a largo plazo para incrementar resistencia a corto plazo
Montmorilonita	Cal	Para mejorar trabajabilidad y adquirir resistencia a corto plazo
Clorita	Cemento	Aún no hay experiencia concluyente sobre los efectos de esta estabilización

Fuente: "La ingeniería de suelos en las vías terrestres" Vol.2

III. METODOLOGIA

Este capítulo tiene el objetivo de dar a conocer la metodología, mediante la explicación detallada de los procesos y herramientas que se usaron para la solución del problema planteado en esta tesis.

Consistió en los siguientes pasos:

3.1 Experimentación.

3.2 Selección del lugar y muestreo del suelo.

3.3 Clasificación e identificación del suelo de estudio.

3.4 Determinación de la dosificación adecuada de cemento portland mediante el método detallado propuesto por la Portland Cement Association (PCA).

3.4.1 Selección de los porcentajes de cemento portland para la preparación de los especímenes de prueba.

3.4.2. Determinación del contenido óptimo de agua para los especímenes de suelo-cemento mediante la prueba Proctor estándar (ASTM D-558).

3.4.3. Método estándar de ensayo para humedecimiento y secado de mezclas de cemento compactado con suelo (ASTM D 559).

3.4.4. Método estándar de ensayo para la resistencia a la compresión simple de cilindros moldeados de suelo cemento (ASTM D 1632, ASTM D 588).

3.1. Experimentación.

Se empleó el método detallado propuesto por la P.C.A. para determinar la dosificación adecuada de cemento Portland a un suelo granular, que consistió en una serie de pruebas realizadas a especímenes de suelo con diferentes porcentajes en peso de cemento portland de 3%, 4%, 5% y 7%. Que para los fines y alcance de este trabajo fueron: prueba de compactación, humedecimiento secado y de resistencia a la compresión simple.

Estas pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio bajo las condiciones ambientales de Ciudad Obregón y con el equipo disponible en el laboratorio de Ingeniería civil del ITSON.

3.2. Selección del lugar y Muestreo del suelo.

El suelo que se estudió para realizar las pruebas necesarias para su estabilización con cemento Portland fue suelo de grano grueso proveniente de un banco de materiales para usarse en alguna estructura de tierra de alguna obra civil.

El muestreo se llevó a cabo en una obra en etapa de construcción. Para esta investigación fue el fraccionamiento Puente Real. Ver figuras de III.1, III.2 y III.3.

Dicho suelo proviene de un banco de material que se ubica en el kilómetro 18+000 de la carretera federal México 15, tramo: Ciudad Obregón - Guaymas.

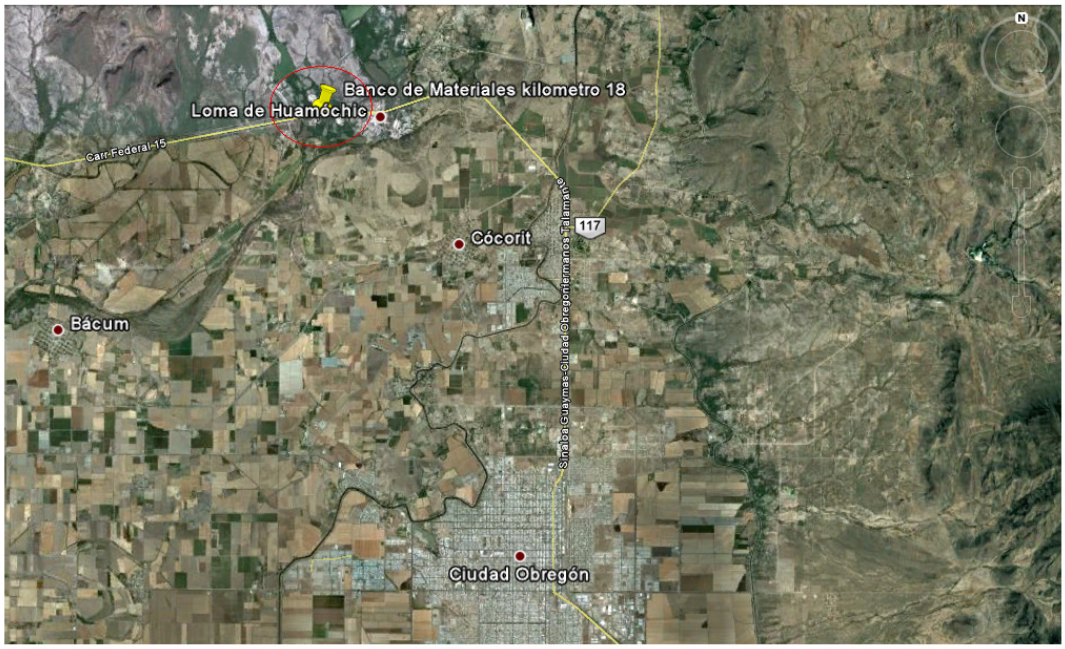

Figura III.1. Ubicación de material de banco.

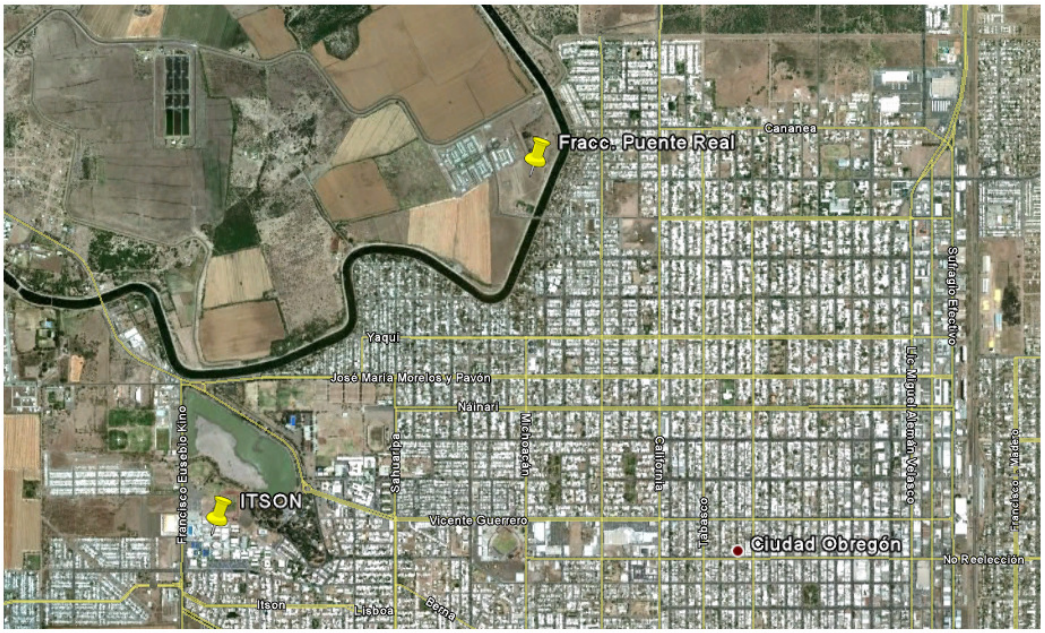

Figura III.2. Fraccionamiento puente real.

Figura III.3 Lugar donde se encontraba el suelo grueso.

3.3 Clasificación e identificación del suelo de estudio

Las pruebas necesarias para la clasificación del suelo fueron granulometría (Ver figura III.4) y límites de plasticidad: limite plástico (LP) (Ver figura III.5), limite liquido (LL) (Ver figura III.6). Se realizo la prueba de contracción lineal como auxiliar. Los métodos que se aplicaron para la clasificación del suelo fueron el SUCS, y AASHO.

Figura III.6 prueba de granulometría (Norma ASTM D422)

Figura III.5 Elaboración de los rollos para la obtención de el limite plástico (Norma ASTM D4318).

Figura III.6 Aparato de cono para prueba del límite liquido (Norma ASTM D4318).

3.4 Determinación de la dosificación adecuada de cemento Portland mediante el método detallado propuesto por la Portland Cement Association (PCA).

Para la determinación del contenido adecuado de cemento se recurrió a la metodología propuesta por la PCA, el cual viene descrito en el libro "suelo-cemento" de Eduardo de la Fuente Lavalle. En este libro se describe explícitamente los procedimientos propuestos de acuerdo con la clasificación del suelo, con que urgencia se desean obtener los resultados y la importancia del proyecto. En la figura III.7, aparece un diagrama en el cual se muestran los distintos procedimientos posibles para la determinación adecuada de la proporción de cemento.

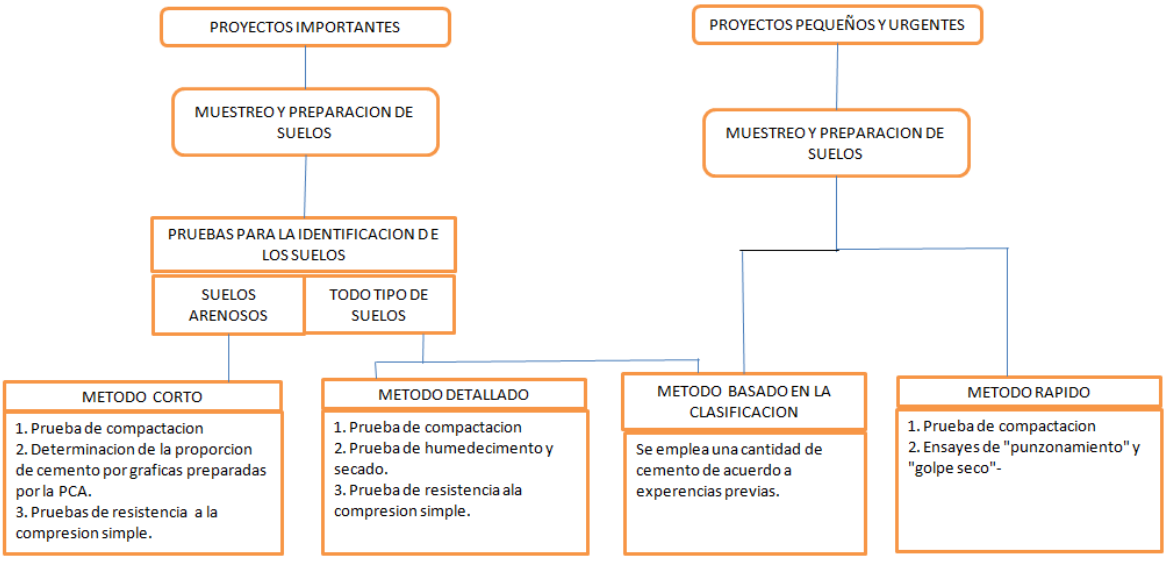

Figura III.7 Metodos de la P.C.A. para proyectos de tratamientos de suelos con cemento.
Fuente: Portland Cement Association.

Los pasos a seguir para obtener la dosificación adecuada de cemento Portland son:

1.- Clasificar el suelo, y verificar en que método es más conveniente realizar el experimento. Se seleccionó el método detallado debido a la importancia de este experimento y que además acepta cualquier tipo de suelo.

2.- Preparar distintas mezclas de suelo-cemento con las dosificaciones que se muestran en la tabla III.1 para realizar las distintas pruebas de laboratorio, agregando a ellas la humedad optima obtenida a partir de la prueba de compactación Proctor estándar (ASTM D558).

Tabla III.1 Dosificaciones de cemento para realizar las pruebas de laboratorio

Clasificación de suelo AASHTO	Clasificación de suelo ASTM	Rango de cemento requerido típico * porcentaje por peso	Contenido de cemento típico para el ensayo humedad-densidad (ASTM 558) porcentaje por peso	Contenido de cemento típico para el ensayo de durabilidad (ASTM D 559 y D506) porcentaje por peso
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM	3-5	5	3-5-7
A-1-b	GM, GP ,SM, SP	5-8	6	4-6-8
A-2	GM, GC, SM, SC	5-9	7	5-7-9
A-3	SP	7-11	9	7-9-11
A-4	CL, ML	7-12	10	8-10-12
A-5	ML, MH, CH	8-13	10	8-10-12
A-6	CL, CH	9-15	12	10-12-14
A-7	MH, CH	10-16	13	11-13-15

Fuente: Portland Cement Association

3.- Someter los especímenes a la prueba de mojado-secado.

4.- Según la Portland Cement Association, de los EUA, la dosificación adecuada de cemento es la mínima que cumple con las condiciones siguientes:

I.- Las pérdidas de material desagregado durante los doce ciclos en el ensayo de humedad- secado no deben ser mayores que los que se muestran en la tabla III.2.

Tabla III.2. Máximas perdidas permitidas por la Portland Cement Association.

MÁXIMA PÉRDIDA PERMISIBLE EN LAS PRUEBAS DE DURABILIDAD RECOMENDADA POR LA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION*.		
Tipo de suelo	Clasificación AASHO	Máximo de pérdidas
Gravas y Arenas	A-1, A-3, A-2-4, A-2-5	14%
Suelos Limosos	A-2-6, A-2-7, A-4, A-5	10%
Suelos Arcillosos	A-6, A-7	7%

Fuente: Portland Cement Association.

II.- El aumento de volumen en las muestras no debe exceder en más del 2% del volumen inicial.

III.- El máximo contenido de agua no debe ser mayor que el necesario para llenar los huecos del suelo-cemento, una vez terminado de compactar.

5.- Posteriormente, se sujetan las probetas a pruebas de resistencia a la compresión simple y a las pruebas adicionales que fuesen necesarias según lo determinen las necesidades del proyecto.

A continuación se describen cada una de las pruebas de laboratorio necesarias para determinar la dosificación adecuada de cemento Portland por el método detallado de la P.C.A.

3.4.1. Selección de los porcentajes de cemento Portland para la preparación de los especímenes de prueba.

Se realizó la prueba de compactación Proctor estándar para determinar el contenido óptimo del agua y peso específico seco, se llevó a cabo con el 5% de cemento del peso seco del suelo. Ver la tabla III.1 donde se muestra con que porcentaje de cemento realizar la prueba, ya que el suelo corresponde a una arena mal graduada con poca o nula plasticidad (SP) o un suelo A-1-a según la AASHO.

La prueba de humedecimiento secado y de resistencia a compresión simple se llevó a cabo con 3, 4, 5 y 7% de cemento respecto al peso seco del suelo.

3.4.2. Determinación del contenido óptimo de agua para los especímenes de suelo-cemento mediante la prueba Proctor estándar "Metodo C" (ASTM D 558).

De acuerdo a la norma Se utilizó el método C, debido a la granulometría del suelo.

Equipo:

- Molde Proctor de 6” de diámetro
- Martillo de compactación Proctor.
- Charola grande
- Báscula
- Enrasador
- Cucharón
- Gato hidráulico
- Horno
- Cuchillo
- Vernier
- Cápsulas de porcelana

Procedimiento:

1.- Se tomó una muestra representativa de suelo seco que pasó la malla No 3/4 y posteriormente se pesó y se mezcló con el cemento requerido (en este caso 5% en peso).

Figura III.8 Suelo con el cemento requerido, a punto de ser mezclado.

2.- Se agregó una cantidad de agua suficiente para la mezcla y se revolvió durante 5 minutos, para después dejarlo otros 5 minutos para que el agua se incorporara bien.

3.- Se colocó el suelo en el molde Proctor en tres capas. A cada capa se le aplicó 54 golpes con el martillo a una altura de 30 cm aproximadamente, escarificando cada una de sus capas para su adherencia.

4.- Al terminar la compactación se retiró el collarín del molde y se enrasó el suelo a la parte superior del molde.

5.- Se extrajo el espécimen del molde con ayuda del gato hidráulico. Ver figura III.9.

Figura III.9. Extracción del espécimen de suelo-cemento con el gato hidráulico.

6.- Se tomaron las dimensiones del espécimen con el vernier para la determinación de su volumen.

7.- Se pesó el espécimen en la báscula y se determinó su peso específico.

9.-Se tomó una muestra del suelo compactado de aproximadamente 100 g, del centro del espécimen y se metió al horno por un periodo de 24 horas.

10.- Se retiró el suelo del horno y se calculó la humedad.

11.- Se repitió el procedimiento desde el paso 2 al 10, aumentando la cantidad de agua que se le agrega a la mezcla, el número de veces hasta que el peso específico de la muestra disminuyó en relación a los anteriores.

Resultados.

Se determina el contenido de agua óptimo y el peso específico seco máximo de la gráfica: contenidos de humedad contra el peso específico seco calculado.

3.4.3. Método estándar de ensayo para humedecimiento y secado de mezclas de cemento compactado con suelo (ASTM D 559).

El propósito de esta prueba fue simular las fuerzas de tensión y compresión generadas internamente en la masa del suelo-cemento compactado debido a los cambios de humedad para que, por medio del análisis de las mediciones respectivas, se pudiera evaluar lo más aproximadamente posible el comportamiento de los suelos tratados cuando les ocurran cambios de humedad en el campo.

En teoría se trató de simular aproximadamente en el laboratorio lo que acontece en la naturaleza para ajustar posteriormente de acuerdo con los resultados obtenidos en el campo.

Método de ensayo C- (norma ASTM D 558) Uso de material del suelo que pasa el tamiz con abertura de 3/4".

Equipo:

- Molde Proctor de 6”
- Martillo de compactación Proctor.
- Charola grande
- Báscula
- Enrasador
- Cucharón
- Gato hidráulico
- Horno
- Cuarto de curado
- Cepillo de alambre
- Vernier
- Cuatro baldes

Procedimiento:

1.- Se tomó una muestra representativa de suelo seco que fue de 5 kg y se mezcló con la cantidad de cemento requerido, de tal forma que se incorporara al suelo el 3, 4, 5 y 7% de cemento.

2.- Se agregó la cantidad de agua óptima a la mezcla y se revolvió durante 5 minutos, para después dejarlo otros 5 minutos para que el agua se incorporara bien.

3.- Se tomó una muestra de aproximadamente 100 g. y se metió al horno para determinar su humedad y verificar que fuera la humedad óptima. Ver figura III.10

Figura III.10 Horno donde se seco el suelo

4.- Se colocó el suelo en el molde Proctor en tres capas. A cada capa se le aplicó 56 golpes con el martillo a una altura de 30 cm aproximadamente, escarificando cada una de sus capas para su adherencia. Ver figura III.11.

Figura III.11. Compactación del suelo.

5.- Al terminar la compactación se retiró el collarín del molde y se enraso la parte superior.

6.- Se extrajo el espécimen del molde con ayuda del gato hidráulico.

7.- Se tomaron las dimensiones del espécimen con el vernier para la determinación de su volumen.

8.- Se pesó el espécimen en la báscula.

9.- Se llevó el espécimen al cuarto de curado para que permaneciera durante 7 días, a temperatura constante (Ver figura III.12.).

Figura III.12. Especímenes compactados después del curado.

10.- Al finalizar el curado se sumergió el espécimen en agua potable a temperatura ambiente durante 5 horas (Ver figura III.13.).

Figura III.13. Saturación de los especímenes.

11.- Al terminar la saturación se registraron las dimensiones del espécimen y se colocaron en el horno durante 42 horas a una temperatura de 71 °c.

12.- Se sacaron los especímenes del horno y se dio dos pasadas en cada sitio con el cepillo de alambre con una fuerza aproximada de 3 libras (Ver figura III.14.).

Figura III.14 Cepillado de los especímenes después del secado.

13.- Después del cepillado era necesario repetir los pasos 10,11 y 12 durante 12 ciclos.

14.- Al terminar el cepillado del último ciclo se volverían a tomar las dimensiones y peso del espécimen para determinar las perdidas.

Resultados.

Se presentan en porcentaje las pérdidas de peso de los especímenes de suelo-cemento con respecto al peso inicial.

% Perdidas= $\frac{Wi-Wf}{Wi}$ x 100

Wi= Peso inicial del espécimen.

Wf= Peso del espécimen al término de todo el proceso.

3.4.4. Método estándar de ensayo para la resistencia a la compresión simple de cilindros moldeados de suelo cemento (ASTM D 1633).

El propósito de esta prueba fue medir la resistencia a la compresión simple de un suelo grueso tratado con cemento además de su módulo de elasticidad. Se midió la resistencia a la compresión a los 2 y a los 7 días. A los 7 días es cuando debe tener una resistencia a la compresión mínima (Ver tabla II.1), se hicieron especimenes de 2 días solo para observar el incremento de resistencia.

Equipo:

- Molde proctor estándar de 4 pulgadas de diámetro
- Martillo manual de 2 pulgadas de diámetro y 5.5kg de peso
- Gato hidráulico
- Enrasador
- Malla ¾
- Cucharón
- Bascula
- Cuatro Baldes
- Equipo para tronar los especimenes (Versa Tester)
- Micrómetro
- Aceite
- Charola grande

Procedimiento

Método A norma D1633

Método B norma D558

1.- Cribar el suelo por la malla numero ¾ (después de secado y disgregado) y obtener aproximadamente 5kg.

2.- Mezclar con la dosificación de cemento requerida ya sea 3%,4%,5% o 7% de cemento y con la humedad optima obtenida en la prueba de compactación.

3.- Compactar en tres capas el suelo, dando 25 golpes con el martillo, dentro del cilindro proctor, hasta alcanzar una altura de 1 centímetro mayor a la unión del collarín.

4.- Extraer la muestra por medio del gato hidráulico.

5.- Dejar curar las muestras durante dos y siete días.

6.- Después del curado saturar en agua durante cuatro horas los especímenes.

7.- Tomar dimensiones y peso de las muestras.

8.- En la maquina versatester (Ver figura III.15) someter a compresión los especímenes y tomar lectura de carga a cada 0.1mm de deformación, hasta que el espécimen falle.

Figura III.15 Maquina Versa Tester

Resultados.

Los resultados de la prueba de resistencia a compresión se expresaran en kg/cm² mediante la siguiente fórmula.

Resistencia a compresión

$$qu = \frac{carga\ aplicada\ (kg)}{area\ de\ la\ base\ (cm^2)}$$

Nota: Debido a la relación altura-diámetro de los especímenes en el método que se usó en la prueba de resistencia a la compresión, la resistencia a la compresión final se divide entre 1.1 de acuerdo con la norma de la ASTM

Peso volumétrico

$$\gamma m = \frac{masa\ especimen\ (gr)}{volumen\ especimen\ (cm^3)}$$

Módulo elástico

$$E = \frac{\text{esfuerzo normal } (\frac{kg}{cm^2})}{\text{deformacion unitaria } (\frac{mm}{mm})}$$

Nota: Se obtuvo de la pendiente de la gráfica de esfuerzo-deformación unitaria ajustada, en su rango elástico.

IV. RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el laboratorio, en base a lo establecido en el capítulo 3.

4.1. Clasificación e identificación del suelo de estudio.

a) Limite líquido (Ll) (Prueba del cono).

Ll= 28%.

b) Limite plástico (Lp).

Lp= Inapreciable

Ip= Índice plástico

Ip= 0

C) Contracción lineal (Cl)

Cl= 3.68 %

En el apéndice A se muestra la memoria de cálculos del límite líquido y contracción lineal.

d) Granulometría

11.41% de finos (pasa la malla No. 200); 43.13% de grava (retenido en la malla No. 4); y 45.46% de arena (pasa malla No 4) Ver figura IV.I.

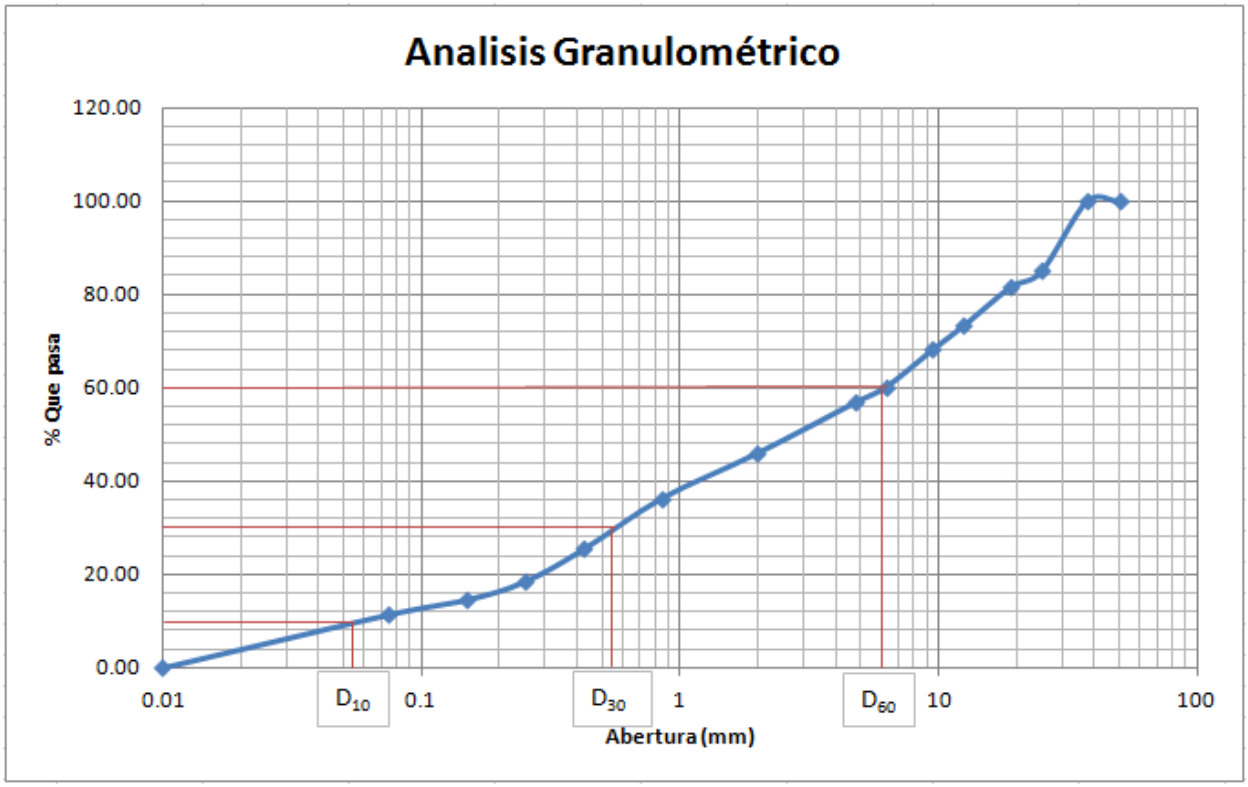

Figura IV.1. Grafica de granulometría

Según el método SUCS

El suelo que se estudio es una arena gravosa mal graduada, con poco o ningún fino (SP).

Según el método AASHTO

El suelo estudiado corresponde a un suelo A-1-a

En el apéndice A se muestra la tabla No. 1 y 2 de cálculos de la granulometría y las tablas para la clasificación del suelo por el método SUCS Y AASHTO.

4.2. Determinación de la dosificación adecuada de cemento portland mediante el Método detallado propuesto por la PCA.

4.2.1. Determinación del contenido optimo de agua para los especímenes de suelo cemento mediante la prueba Proctor estándar (ASTM D558).

Tabla IV.1 Determinación del contenido optimo de agua para los especímenes de suelo

ENSAYE	w%	δd(kg/m^3)
1	4.78	2028.20157
2	5.55	2084.84349
3	10.29	2063.51294
4	8.41	2114.65729
5	10.97	2033.94202

Donde: w%= porcentaje de humedad

δd= peso especifico seco

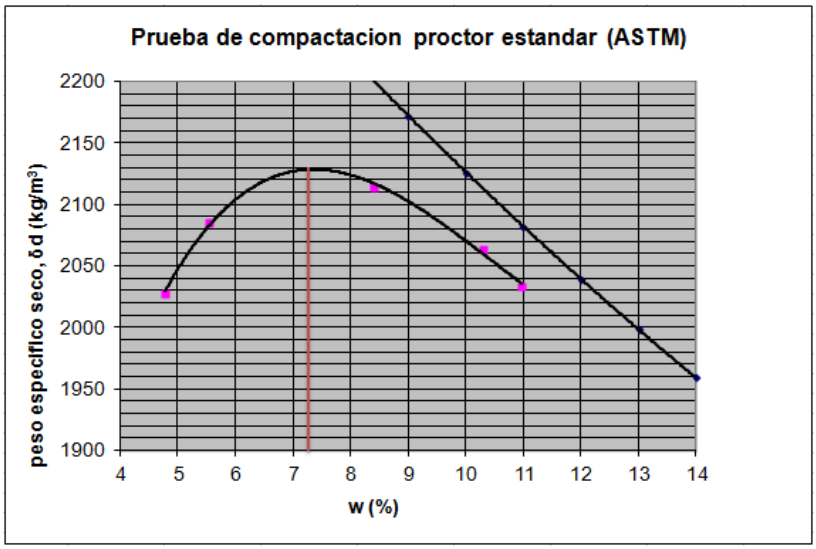

Figura IV.2. Curva de contenido de humedad optima de la prueba

En base a las pruebas realizadas en el laboratorio se logró encontrar la humedad optima del suelo estudiado con 5% de cemento, que fué de 7.3% y su peso especifico maximo de 2130 Kg/m^3 . Ver figura IV.2

En el apéndice B se muestra la memoria de cálculos para la obtención de la humedad óptima y el peso volumétrico máximo.

4.2.2. Determinación del porcentaje de pérdidas debido al humedecimiento y secado de mezclas de suelo-cemento compactado (ASTM D 559).

Tabla IV.2 Determinación del porcentaje de pérdidas debido al humedecimiento y secado

ESPECIMEN No.	% DE CEMENTO	PESO INICIAL (Wi) Kg	PESO FINAL (Wf) Kg	PERDIDA %
1	3	4.49	3.85	14.25
2	4	4.535	4.24	6.5
3	5	4.52	4.26	5.75
4	7	4.59	4.415	3.81

% Perdidas = ((Wi-Wf)/Wi)*100

Los porcentajes de cemento adecuados para la estabilizacion de este suelo son 4%, 5% y 7% ya que tuvieron perdidas de material menores a la permitida por las normas establecidas por la ASTM que es de 14% en peso. Ver tabla III.2

Figura IV.3. Espécimen con el 7%.

Figura IV.4. Espécimen con el 5%.

Figura IV.5. Espécimen con el 4%.

Figura IV.6. Espécimen con el 3%

En las figuras de IV.3 a IV.6 se muestra el estado en que se encuentran los especímenes para diferentes porcentajes de cemento después de 12 días de cepillado.

En el apéndice B se muestra la tabla de cálculos de los 12 ciclos de cepillado.

4.2.3. Determinación de la resistencia a la compresión simple de cilindros de suelo cemento (ASTM D 1633).

Tabla IV.3 Determinación de la resistencia a la compresión simple a dos días de curado

ESPECIMEN No	% de Cemento	Días de Curado	Resistencia a la Compresión qu=Kg/cm^2	Módulos Elásticos (kg/cm²)
1	3	2	11.2	2400
2	4	2	17.7	2266.66
3	5	2	18.4	1485.71
4	7	2	27.5	2500

Tabla IV.4 Determinación de la resistencia a la compresión simple a siete días de curado

ESPECIMEN No	% de Cemento	Días de Curado	Resistencia a la Compresión qu=Kg/cm^2	Módulos Elásticos (kg/cm²)
1	3	7	17.7	1866.66
2	4	7	20.5	1333.33
3	5	7	21	1666.66
4	7	7	35	1785.71

En el Apéndice B se muestra la memoria de cálculos de la resistencia a la compresión simple, y módulos elásticos de suelo-cemento, además de las graficas de esfuerzo-deformación unitaria de los especímenes.

A continuación se presentan los comportamientos de resistencia a la compresión simple contra el porcentaje de cemento a 2 y 7 días. Véase figuras IV.7, IV.8 y IV.9

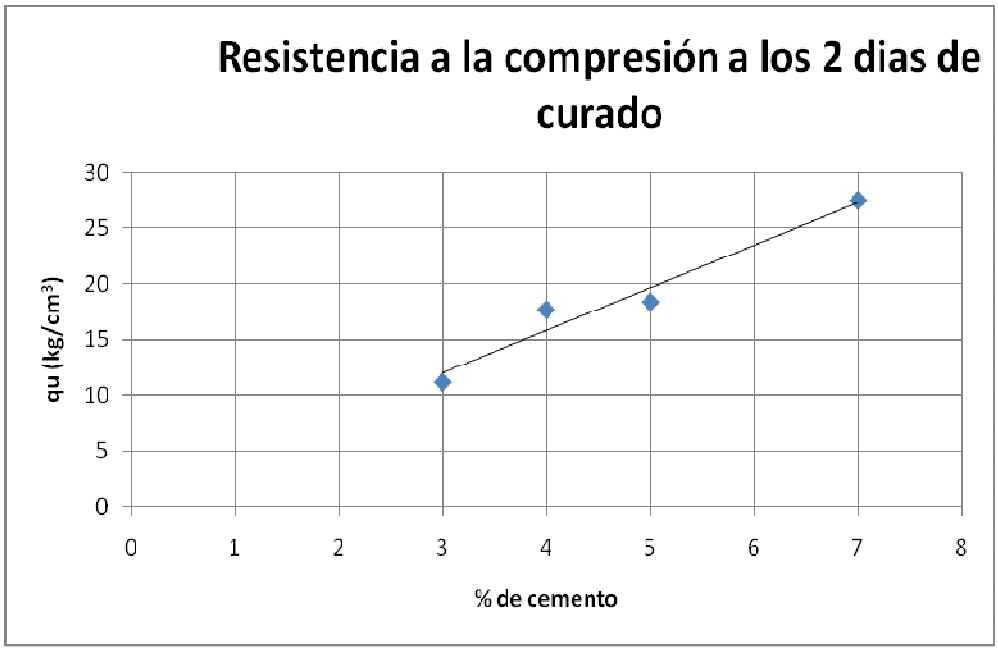

Figura IV.7. Gráfica de resistencia a compresión simple promedio contra % de cemento Portland a los 2 días de curado.

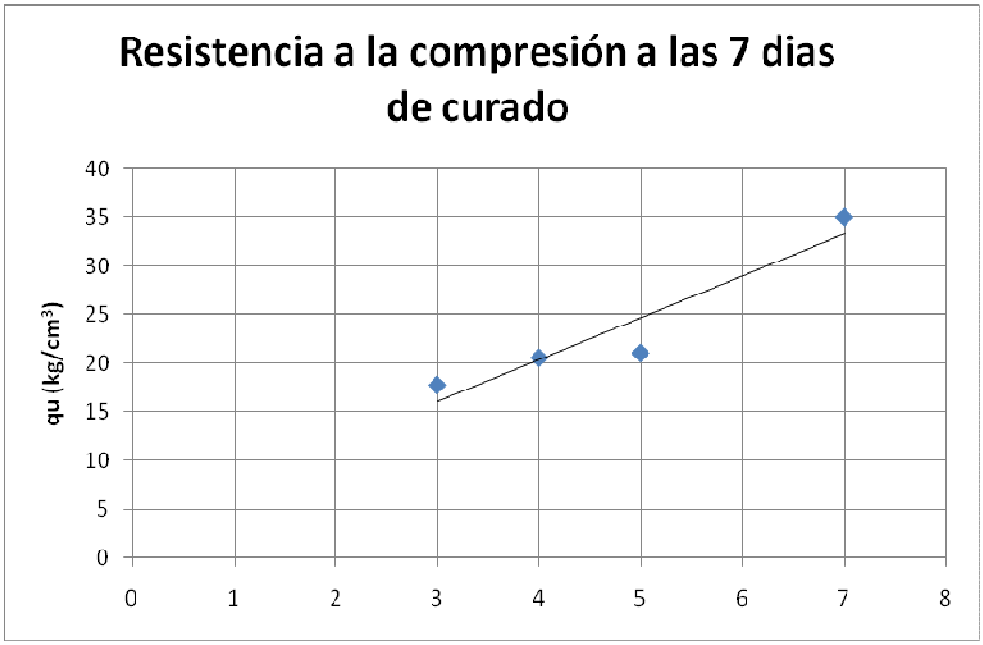

Figura IV.8. Gráfica de resistencia a compresión simple promedio contra % de cemento Portland a los 7 días de curado.

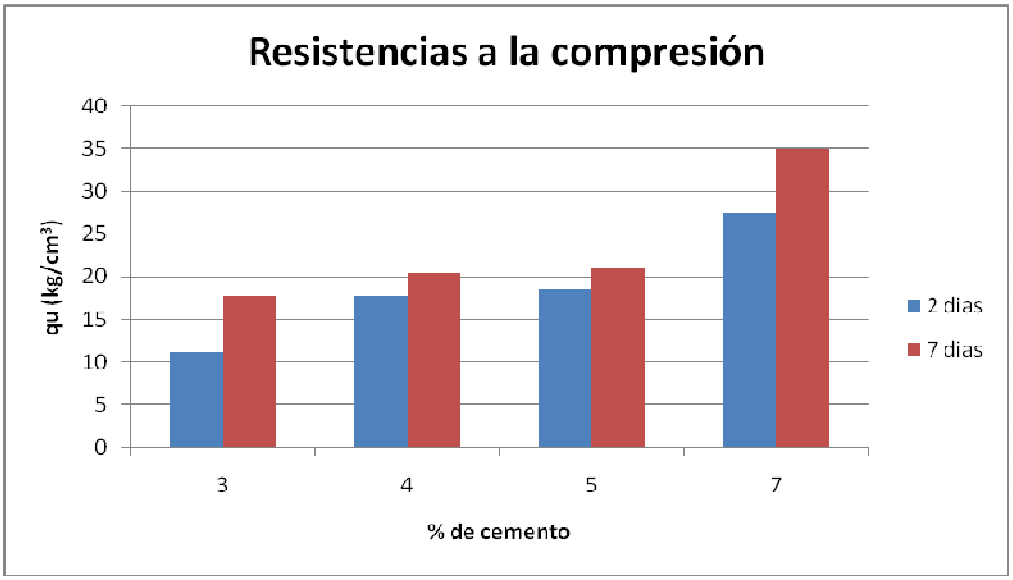

Figura IV.9. Gráfica comparativa de resistencias a compresión simple a los 2 y 7 días de curado.

Como lo muestran las gráficas las resistencias aumentaron en relación que aumento su cantidad de cemento agregado y al tiempo de curado de los especímenes.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.

En general, los experimentos realizados con los especímenes de suelo-cemento, siguiendo la metodología propuesta por la PCA, arrojaron buenos resultados, se realizaron de forma efectiva y tuvieron buena resistencia, cumpliéndose positivamente con la hipótesis planteada.

Se obtuvo un suelo granular con nula plasticidad; con finos no plásticos, por lo que no presenta problemas de expansión.

Según la PCA la prueba de durabilidad (humedecimiento-secado), influye de forma directa en la determinación del porcentaje de cemento a usar, se obtuvo que el espécimen con porcentaje de 3% de cemento, obtuvo perdidas mayores al

14%, y los que obtuvieron resultados inferiores al 14% de perdidas de material fueron los especímenes de 4%, 5% y 7%.

De acuerdo con los resultados de la prueba de resistencia a la compresión simple, los especímenes que no tuvieron perdidas de material mayores a 14% en la prueba de durabilidad, en este caso 5% y 7% son los recomendables a usar de acuerdo con la tabla II.1 ya que muestra para nuestro tipo de suelo de estudio una resistencia entre 21kg/cm^2 a 42kg/cm^2, Por lo que para los fines y alcance de este estudio, la dosificación adecuada para cumplir con durabilidad, resistencia y economía es 5% de cemento.

Con los resultados obtenidos se demuestra que la aplicación de cemento al suelo granular es satisfactoria, obteniendo buena resistencia y durabilidad, pudiendo tomarse en cuenta en cualquier obra como una alternativa confiable, haciendo los estudios previos al suelo presente.

5.2. Recomendaciones.

- Cuando se tiene un suelo granular, es ampliamente recomendable el uso del cemento, ya que se obtienen mejores resultados, en relación a un suelo fino arcilloso.
- Se recomienda un mayor uso de suelo-cemento en el país, ya que en obras civiles se puede obtener mayor resistencia y durabilidad; así como contribuir con el cuidado del medio ambiente, al reducir las cantidades de materiales de bancos de préstamo.
- Realizar una mezcla homogénea del suelo-cemento, mezclando el cemento y suelo el suficiente tiempo (aproximadamente 5 minutos), hasta obtener un color uniforme. De lo contrario, se pueden obtener resultados no esperados.

- Cuidar que el suelo-cemento se seque antes de realizar las pruebas de laboratorio una vez que se humedece con la humedad optima, ya que el cemento reacciona con el agua y se endurece, lo anterior se puede lograr, cubriendo el suelo expuesto, con una charola grande encima de el.

- Cuidar la integridad de los especimenes, y realizar el curado de forma que no se pierda la humedad de forma rápida, lo anterior se puede lograr cubriendo los especímenes con toallas de papel húmedos dentro de bolsas de plástico, para que adquieran resistencia de forma gradual con el tiempo.

APENDICE A.

CLASIFICACIÓN DEL SUELO

a) Límite líquido (Prueba del cono)

Muestra 1

Frasco #1			
	Húmedo	**Seco**	**Humedad (%)**
Peso (gr)	189.8	152.9	24.13
	PENETRACION (mm)		8.90

Muestra 2

Frasco #2			
	Húmedo	**Seco**	**Humedad (%)**
Peso (gr)	176.7	138.5	27.58
	PENETRACION (mm)		16.25

Muestra 3

Frasco #3			
	Húmedo	**Seco**	**Humedad (%)**
Peso (gr)	81.6	62.7	30.14
	PENETRACION (mm)		27.70

Muestra 4

Frasco #4			
	Húmedo	**Seco**	**Humedad (%)**
Peso (gr)	80.8	61.3	31.81
	PENETRACION (mm)		31.65

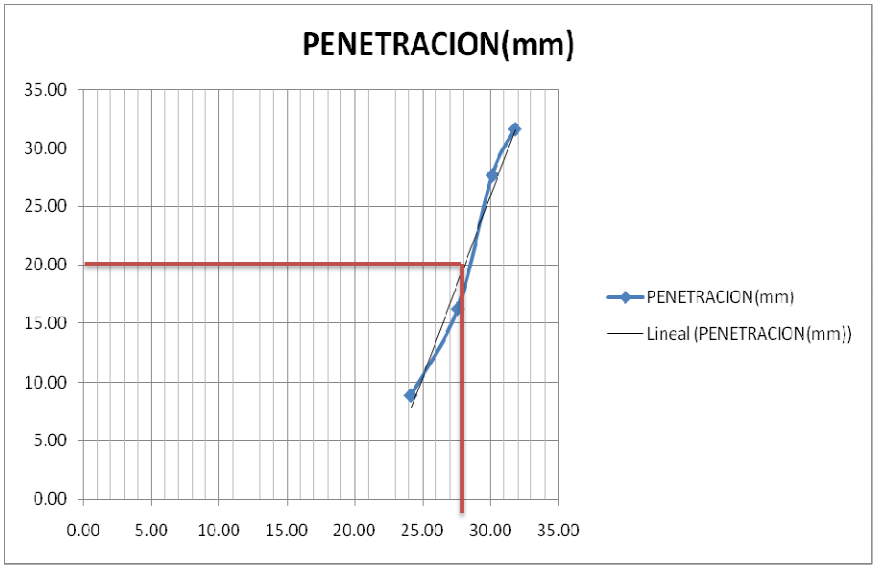

Figura 1. Grafica para determinación del límite liquido.

b) Contracción lineal

CONTRACCION LINEAL				
MUESTRA	Li	Lf	Li-Lf	CL (%)
1	10.19	9.77	0.42	4.12
2	9.91	9.59	0.32	3.23
			PROMEDIO =	3.68

c) Granulometría

Malla	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulativo	% Que pasa la malla
Malla 2"	50	0.00	0.00	0.00	100.00
Malla $1^{1/2"}$	37.5	0.00	0.00	0.00	100.00
Malla 1"	25	585.00	15.02	15.02	84.98
Malla 3/4"	19	131.00	3.36	18.38	81.62
Malla 1/2"	12.5	322.00	8.27	26.65	73.35
Malla 3/8"	9.5	199.00	5.11	31.76	68.24
Malla 1/4"	6.25	314.00	8.06	39.82	60.18
Malla No. 4	4.75	129.00	3.31	43.13	56.87
Pasa No. 4		2215.00	56.87	100.00	
Suma		3895.00	100.00		

Peso neto	500	gr

Malla	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulativo	% Que pasa la malla
10	2	94.70	10.77	53.90	46.10
20	0.85	85.70	9.75	63.65	36.35
40	0.425	95.60	10.87	74.52	25.48
60	0.25	62.00	7.05	81.57	18.43
100	0.15	33.80	3.84	85.42	14.58
200	0.075	27.90	3.17	88.59	11.41
Pasa No. 200		100.30	11.41	100.00	0.00
Suma		500.00	100.00		

Como más del 50% de material pasó la malla NO. 4 y el Cu dio mayor que 6 y el Cc quedo menor que 1; el suelo quedo clasificado según la SUCS en SP y según la AASHTO en A-1-a.

Tabla 1. Clasificación del suelo (SUCS).

DIVISION PRINCIPAL			SIMBOLO DEL GRUPO	NOMBRES TIPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACION	
SUELOS DE GRANOS GRUESOS 50% o más es retenido en el tamiz No. 200	GRAVAS 50% o más de la fracción gruesa es retenida en el tamiz No. 4	GRAVAS LIMPIAS	GW	Gravas bien graduadas y mezclas de arena y grava con pocos finos o sin finos	Clasificación basada en el porcentaje de finos Menos del 5% pasa por el tamiz No. 200 GW, GP, SW, SP Más del 12% pasa por el tamiz No. 200 GM, GC, SM, SC 5% a 12% pasa por el tamiz No. 200 Para clasificación de fronteras se necesitan símbolos dobles	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Mayor que 4; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Entre 1 y 3
			GP	Gravas y mezclas de gravas y arenas mal graduadas con pocos finos o sin finos		Si los criterios para GW no se cumplen
		GRAVAS CON FINOS	GM	Gravas limosas, mezclas de grava - arena y limo		Límites de Atterberg localizados bajo la línea "A" o índice de plasticidad inferior a 4.
			GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava - arena y arcilla		Límites de Atterberg sobre la línea "A" e índice de plasticidad superior a 7.
	ARENAS Más del 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz No. 4	ARENAS LIMPIAS	SW	Arenas y arenas gravosas bien graduadas con pocos finos o sin finos		$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Superior a 6; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Entre 1 y 3
			SP	Arenas y arenas gravosas mal graduadas con pocos finos o sin finos		Si no se cumplen los criterios para SW
		ARENAS CON FINOS	SM	Arenas limosas, mezclas de arena limo		Límites de Atterberg localizados bajo la línea "A" o índice de plasticidad inferior a 4.
			SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla		Límites de Atterberg sobre la línea "A" e índice de plasticidad superior a 7.

Si los límites de Atterberg se localizan en el área sombreada se debe clasificar utilizando símbolos dobles.

Para los límites de Atterber localizados en el área sombreada se debe clasificar utilizando símbolos dobles.

Tabla 2. Clasificación del suelo (AASHTO).

CLASIFICACION GENERAL	Materiales Granulares (igual o menor del 35% pasa el tamiz Nº 200)							Materiales Limo - Arcillosos (más del35% que pasa el tamiz Nº 200)			
GRUPOS	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
SUB - GRUPOS	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
% que pasa el Tamiz:											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.								
Nº 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 Nº 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					

APENDICE B.

DETERMINACION DE LA DOSIFICACION ADECUADA DE CEMENTO PORTLAND

a) Determinación del contenido óptimo de agua para los especímenes de suelo-cemento mediante la prueba Proctor estándar

Volumen del molde:

Diámetro del molde	15.21 cm
Altura del molde	11.68 cm
Área del molde	0.018169 m^2
Volumen del molde	2122.22cm^3

Prueba

Para obtener la curva de cero vacios de aire se propuso un Ss de 2.7

Se utilizo el 5% de cemento

w (%)	δzav (Kg/m3)
8	2220.39474
9	2172.16412
10	2125.98425
11	2081.72706
12	2039.27492
13	1998.51962
14	1959.36139
15	1921.70819
16	1885.47486
17	1850.58259
18	1816.95828

ensaye	Wb+sh(kg)	Wb(kg)	Wsh(kg)
1	10.3	5.79	4.51
2	10.46	5.79	4.67
3	10.62	5.79	4.83
4	10.655	5.79	4.865
5	10.58	5.79	4.79

Donde: Wsh=peso del suelo húmedo

Wb+sh= peso del cilindró + suelo húmedo

Wb= peso del cilindro

Wsh=Wb+Sh-Wb

W%= Porcentaje de humedad

δzav =Peso especifico en cero vacio de aire

Cálculos para el contenido de humedad W%:

ensaye	wt(gr)	wt+sh(gr)	wt+ss(gr)	wsh(gr)	wss(gr)	w%
1	88.3	206.7	201.3	118.4	113	4.77876106
2	88.3	250	241.5	161.7	153.2	5.54830287
3	52	191.3	178.3	139.3	126.3	10.2929533
4	52	190	179.3	138	127.3	8.40534171
5	50.4	190	176.2	139.6	125.8	10.9697933

Donde: Wt=peso de tara

Wss=peso del suelo seco

Wsh=(wt+sh)-wt

Wss=(wt+wss)-wt

w%=((wsh-wss)/wss)x100

Calculó del peso específico seco de la muestra:

ensaye	wsh(kg)	vm(m^3)	w%	δm(kg/m^3)	δd(kg/m^3)
1	4.51	0.00212223	4.77876106	2125.12448	2028.20157
2	4.67	0.00212223	5.54830287	2200.51692	2084.84349
3	4.83	0.00212223	10.2929533	2275.90937	2063.51294
4	4.865	0.00212223	8.40534171	2292.40146	2114.65729
5	4.79	0.00212223	10.9697933	2257.06125	2033.94202

Donde: δm=peso especifico muestra

δd=peso especifico seco

Vm=volumen de la muestra

δm=wsh/vm

δd=δm/(1+w)

b) Comportamiento del suelo después de 12 ciclos de cepillado

CICLO	3% Kg	4% Kg	5% Kg	7% Kg
1.Peso seco	4.49	4.535	4.52	4.59
Peso raspado	4.43	4.505	4.485	4.565
2.Peso seco	4.405	4.5	4.465	4.545
Peso raspado	4.32	4.45	4.43	4.525
3.Peso seco	4.315	4.44	4.43	4.51
Peso raspado	4.275	4.42	4.405	4.5
4.Peso seco	4.275	4.42	4.405	4.5
Peso raspado	4.085	4.29	4.245	4.35
5.Peso seco	4.085	4.29	4.245	4.35
Peso raspado	4.045	4.265	4.2	4.3
6.Peso seco	4.11	4.345	4.32	4.455
Peso raspado	4.045	4.33	4.31	4.45
7.Peso seco	4.04	4.33	4.3	4.435
Peso raspado	4.01	4.305	4.29	4.425
8.Peso seco	4.01	4.305	4.3	4.415
Peso raspado	3.97	4.295	4.29	4.41
9.Peso seco	3.965	4.29	4.28	4.405
Peso raspado	3.935	4.26	4.27	4.4
10.Peso seco	3.96	4.295	4.32	4.465
Peso raspado	3.915	4.285	4.31	4.46
11.Peso seco	3.895	4.26	4.275	4.425
Peso raspado	3.87	4.25	4.265	4.42
12.Peso seco	3.86	4.245	4.265	4.42
Peso raspado	3.85	4.24	4.26	4.415
PORCENTAJE	14.25	6.50	5.75	3.81

Perdidas %= (Wi-Wf)/(Wi)*100

Donde: Wi= Peso inicial

Wf= Peso final

Nota: se puede apreciar que a veces subía el peso en vez de bajar, esto se debe a que el horno es utilizado por muchos alumnos y nos movían las muestras, pero al final se dejo secar más tiempo para que diera el porcentaje de pérdida.

C) Determinación de la resistencia a la compresión y modulo de elasticidad

Donde:

P= Carga puntual de falla

ΔL= Deformación total

σ= Esfuerzo normal = P/A

Є= Deformación unitaria = $\Delta L/L$

A= Área transversal del espécimen = $\pi * r^2$

L= Longitud del espécimen

E = Modulo de elasticidad = σ/Є

Especímenes con 3% de cemento a dos días de curado

Nota: Debido a la relación altura- diámetro de los especímenes en el método que se uso, la relación a la compresión final se divide entre 1.1 de acuerdo con la norma de la ASTM.

3% A DOS DIAS				
P		ΔL	σ	Є
Lbs	Kg	mm	Kg/Cm^2	
145	65.8	0.3	0.85	0.003
295	133.8	0.4	1.74	0.004
545	247.2	0.5	3.21	0.004
1155	523.9	0.7	6.81	0.006
1555	705.3	0.8	9.16	0.007
1790	811.9	0.9	10.55	0.008
1840	834.6	1	10.84	0.009
1870	848.2	1.1	11.02	0.010
1895	859.6	1.2	11.17	0.011
1875	850.5	1.3	11.05	0.011
1868	847.3	1.4	11.01	0.012
1886	855.5	1.5	11.01	0.013
1895	859.6	1.6	11.17	0.014
1895	859.6	1.7	11.17	0.015
1870	848.2	1.8	11.02	0.016
1840	834.6	1.9	10.84	0.017

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

Peso= 2.14 Kg

L= 114mm

d= 9.9 Cm

A= 76.97 Cm^2

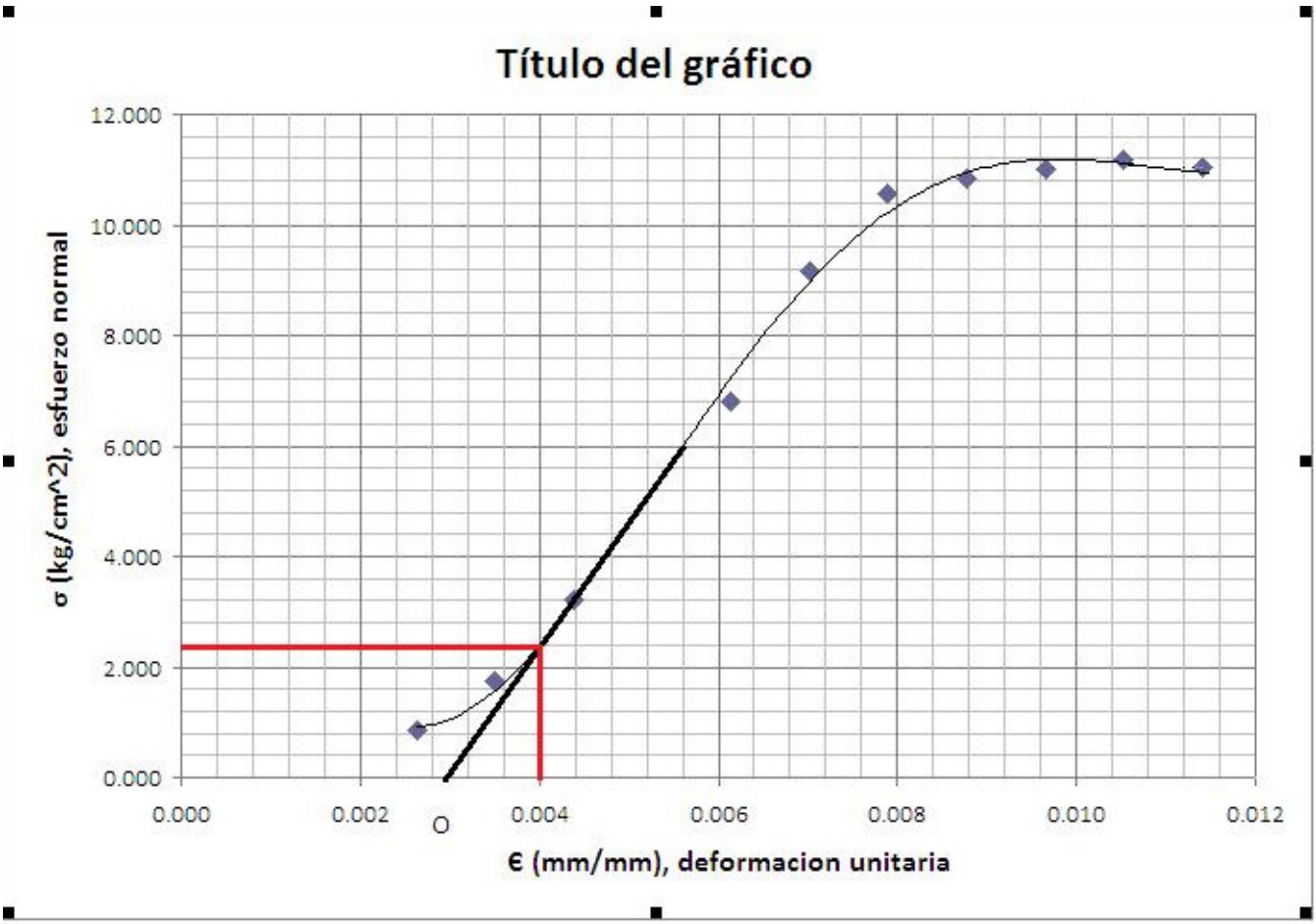

Figura 2. Curva esfuerzo deformación del espécimen de 3% a los dos días de curado

4% de cemento a dos días de curado

4% A DOS DIAS				
P		ΔL	σ	Є
Lbs	Kg	mm	Kg/Cm^2	
110	49.9	0.3	0.65	0.003
230	104.3	0.4	1.36	0.003
435	197.3	0.5	2.56	0.004
635	288.0	0.7	3.74	0.006
1020	462.7	0.8	6.01	0.007
1400	635.0	0.9	8.25	0.008
1800	816.5	1	10.61	0.009
2227	1010.2	1.1	13.12	0.010
2432	1103.1	1.2	14.33	0.010
2564	1163.0	1.3	15.11	0.011
2715	1231.5	1.4	16.00	0.012
2825	1281.4	1.5	16.65	0.013
2927	1327.7	1.6	16.65	0.014
2973	1348.5	1.7	17.52	0.015
3010	1365.3	1.8	17.74	0.016
3023	1371.2	1.9	17.81	0.017
3014	1367.1	2	17.76	0.017
2982	1352.6	2.1	17.57	0.018
2932	1329.9	2.2	17.28	0.019
2864	1299.1	2.3	16.88	0.020

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

Peso= 2.165 Kg

L= 115mm

d= 9.9 Cm

A= 76.97 Cm^2

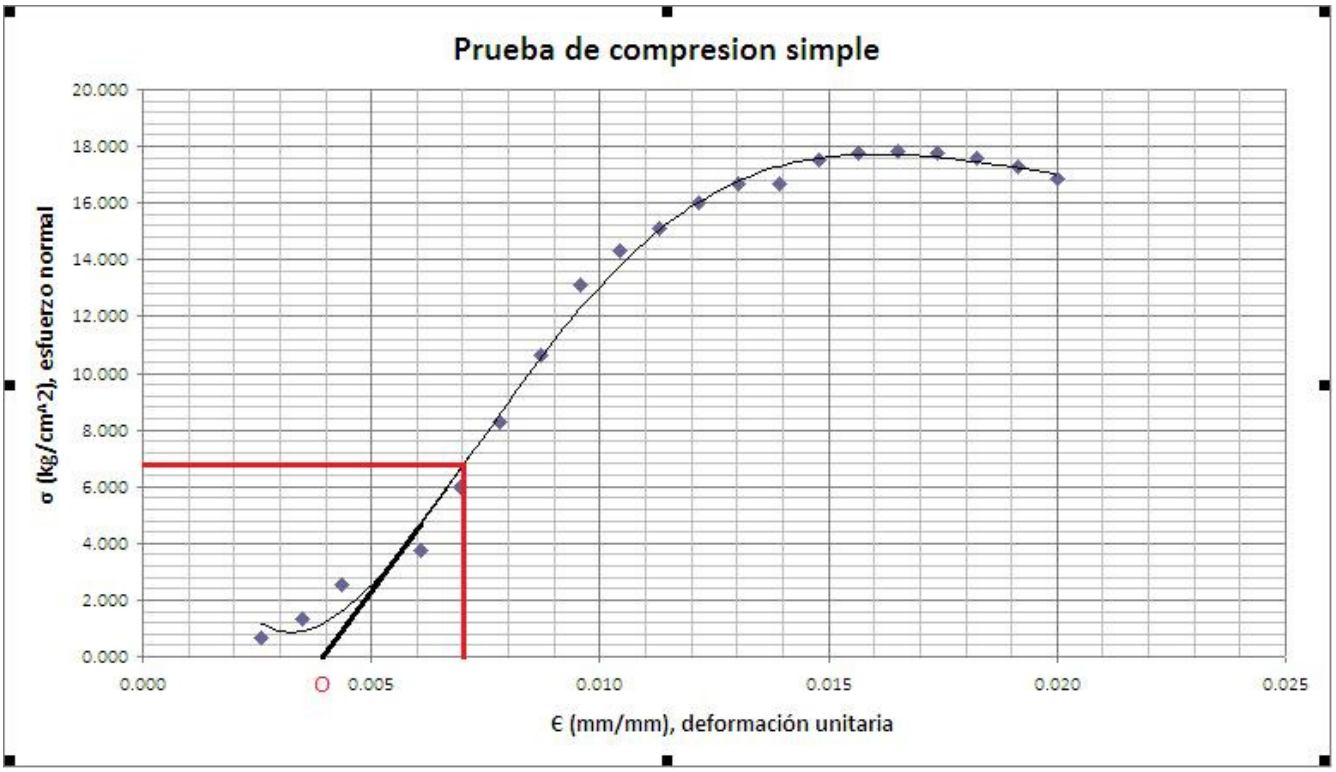

Figura 3. Curva esfuerzo deformación del espécimen de 4% a los 2 días de curado.

5% de cemento a dos días de curado

5% A DOS DIAS				
P		ΔL	σ	Є
Lbs	Kg	mm	Kg/Cm^2	
82	37.2	0.4	0.48	0.004
114	51.7	0.5	0.67	0.004
168	76.2	0.6	0.99	0.005
236	107.0	0.7	1.39	0.006
332	150.6	0.8	1.96	0.007
432	196.0	0.9	2.55	0.008
564	255.8	1	3.32	0.009
755	342.5	1.1	4.45	0.010
959	435.0	1.2	5.65	0.011
1182	536.1	1.3	6.97	0.011
1432	649.5	1.4	8.44	0.012
1591	721.7	1.5	8.44	0.013
1873	849.6	1.6	11.04	0.014
2145	973.0	1.7	12.64	0.015
2314	1049.6	1.8	13.64	0.016
2532	1148.5	1.9	14.92	0.017
2714	1231.1	2	15.99	0.018
2791	1266.0	2.1	16.45	0.018
2882	1307.3	2.2	16.98	0.019
2986	1354.4	2.3	17.60	0.020
3018	1368.9	2.4	17.79	0.021
3082	1398.0	2.5	18.16	0.022
3095	1403.9	2.6	18.24	0.023
3095	1403.9	2.7	18.24	0.024
3091	1402.1	2.8	18.22	0.025
3073	1393.9	2.9	18.11	0.025
3036	1377.1	3	17.89	0.026
2973	1348.5	3.1	17.52	0.027

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

Peso= 2.155 Kg

L= 114mm

d= 9.9 Cm

A= 76.97 Cm^2

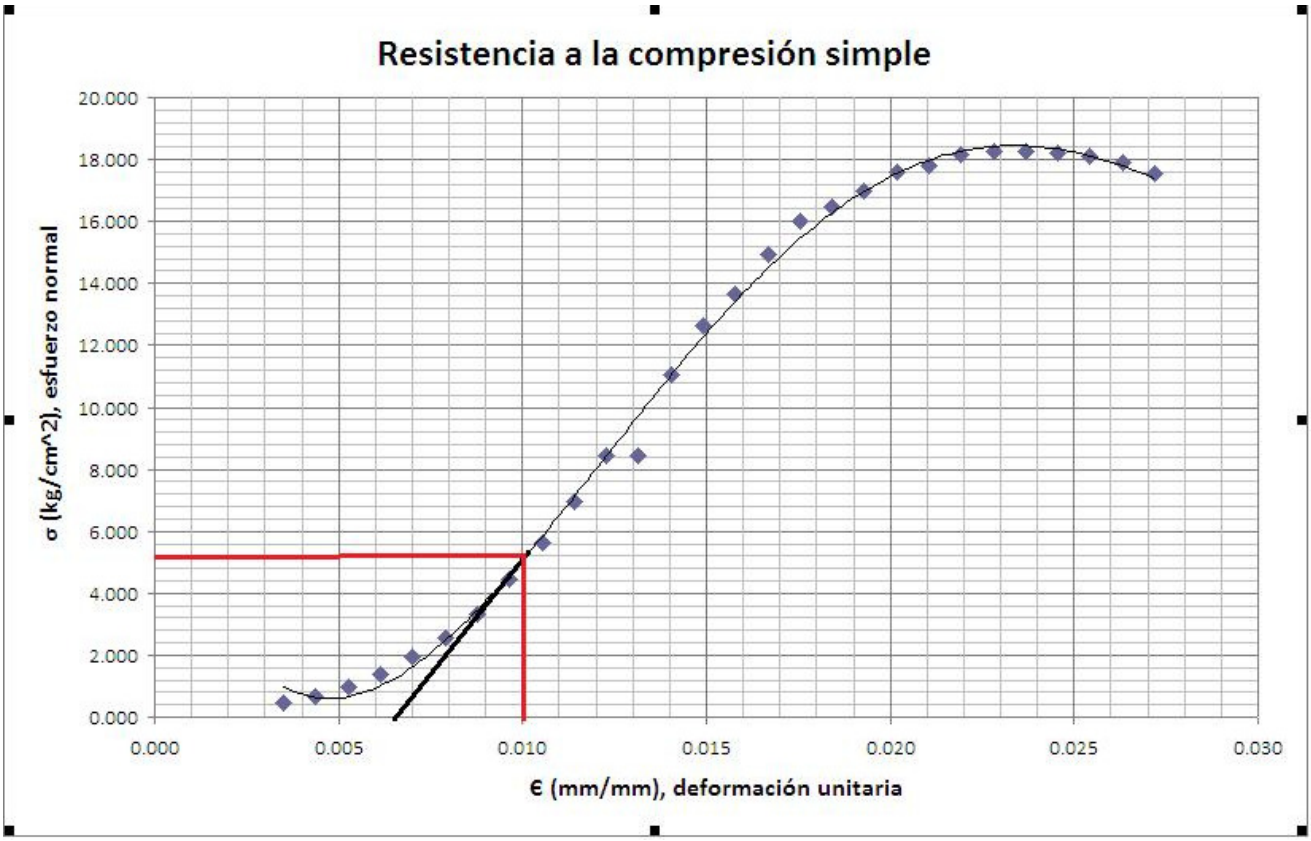

Figura 4. Curva esfuerzo deformación del espécimen de 5% a los 2 días de curado.

7% de cemento a dos días de curado

7% A DOS DIAS				
P		ΔL	σ	Є
Lbs	Kg	mm	Kg/Cm^2	
109	49.4	0.3	0.64	0.003
182	82.6	0.5	1.07	0.004
405	183.7	0.7	2.39	0.006
555	251.7	0.8	3.27	0.007
764	346.5	0.9	4.50	0.008
928	420.9	1	5.47	0.009
1341	608.3	1.1	7.90	0.010
1850	839.1	1.2	10.90	0.010
2418	1096.8	1.3	14.25	0.011
2850	1292.7	1.4	16.80	0.012
3200	1451.5	1.5	16.80	0.013
3614	1639.3	1.6	21.30	0.014
3991	1810.3	1.7	23.52	0.015
4191	1901.0	1.8	24.70	0.016
4414	2002.2	1.9	26.01	0.017
4441	2014.4	2	26.17	0.017
4555	2066.1	2.1	26.84	0.018
4586	2080.2	2.2	27.03	0.019
4545	2061.6	2.3	26.78	0.020
4500	2041.2	2.4	26.52	0.021
4273	1938.2	2.5	25.18	0.022

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

Peso= 2.165 Kg

L= 115mm

d= 9.9 Cm

A= 76.97 Cm^2

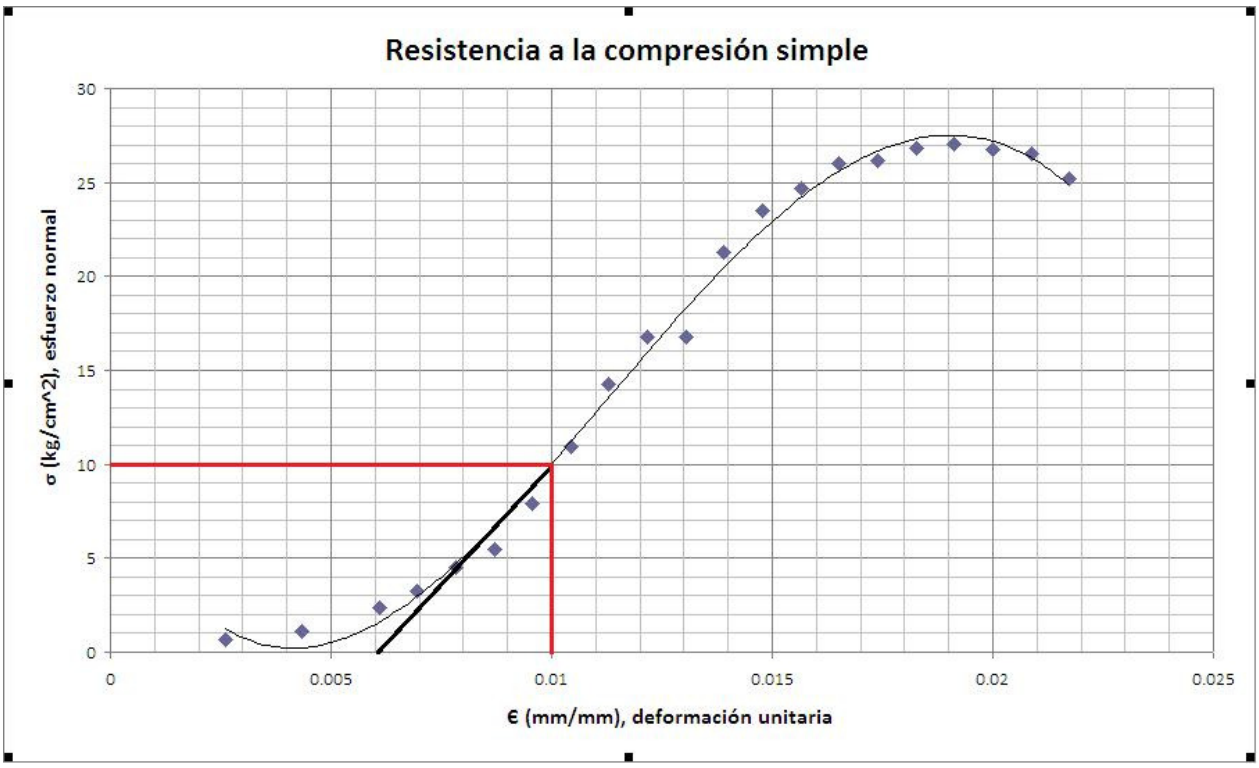

Figura 5. Curva esfuerzo deformación del espécimen de 7% a los 2 días de curado.

3% de cemento a siete días de curado

3% A SIETE DIAS				
P		ΔL	σ	Є
Lbs	Kg	mm	Kg/Cm^2	
50	22.7	0.2	0.29465595	0.002
250	113.4	0.3	1.47	0.003
445	201.8	0.5	2.62	0.004
614	278.5	0.6	3.62	0.005
777	352.4	0.7	4.58	0.006
1023	464.0	0.8	6.03	0.007
1314	596.0	0.9	7.74	0.008
1623	736.2	1	9.56	0.009
1950	884.5	1.1	11.49	0.010
2168	983.4	1.2	12.78	0.010
2445	1109.0	1.3	14.41	0.011
2650	1202.0	1.4	15.62	0.012
2777	1259.6	1.5	15.62	0.013
2823	1280.5	1.6	16.64	0.014
2841	1288.7	1.7	16.74	0.015
2845	1290.5	1.8	16.77	0.016
2886	1309.1	1.9	17.01	0.017
2950	1338.1	2	17.38	0.017
2995	1358.5	2.1	17.65	0.018
3055	1385.7	2.2	18.00	0.019
3059	1387.5	2.3	18.03	0.020
2959	1342.2	2.4	17.44	0.021
2855	1295.0	2.5	16.82	0.022
2809	1274.1	2.6	16.55	0.023
3027	1373.0	2.8	17.84	0.024
2682	1216.5	3	15.81	0.026

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

Peso= 2.12 Kg

L= 115mm

d= 9.9 Cm

A= 76.97 Cm^2

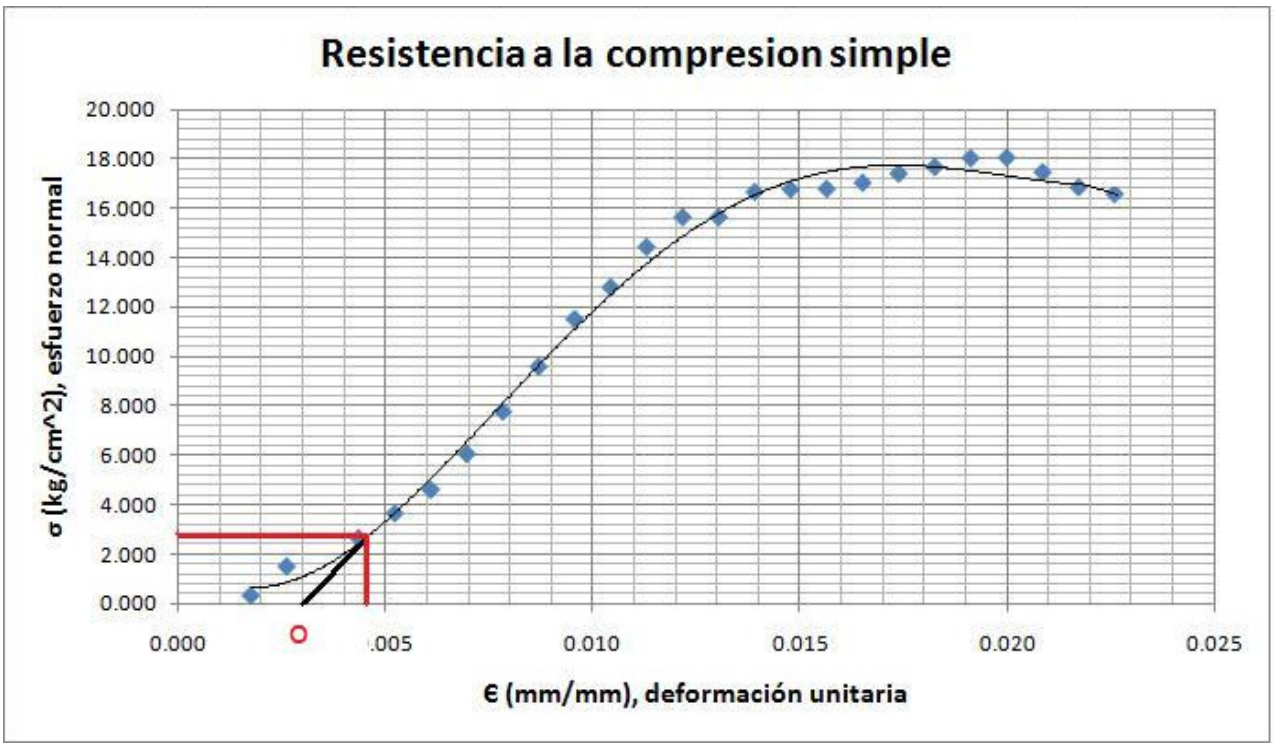

Figura 6. Curva esfuerzo deformación del espécimen de 3% a los 7 días de curado.

4% de cemento a siete días de curado

4% A SIETE DIAS				
P		ΔL	σ	Є
Lbs	Kg	mm	Kg/Cm^2	
18	8.2	0.1	0.11	0.001
36	16.3	0.2	0.21	0.002
45	20.4	0.3	0.27	0.003
127	57.6	0.4	0.75	0.004
145	65.8	0.5	0.85	0.004
227	103.0	0.6	1.34	0.005
391	177.4	0.8	2.30	0.007
650	294.8	1	3.83	0.009
809	367.0	1.1	4.77	0.010
990	449.1	1.2	5.83	0.011
1223	554.7	1.3	7.21	0.011
1423	645.5	1.4	8.39	0.012
1677	760.7	1.5	8.39	0.013
1855	841.4	1.6	10.93	0.014
2168	983.4	1.7	12.78	0.015
2441	1107.2	1.8	14.39	0.016
2695	1222.4	1.9	15.88	0.017
2918	1323.6	2	17.20	0.018
3132	1420.7	2.1	18.46	0.018
3282	1488.7	2.2	19.34	0.019
3332	1511.4	2.3	19.64	0.020
3305	1499.1	2.4	19.48	0.021
3323	1507.3	2.5	19.58	0.022
3359	1523.6	2.6	19.79	0.023
3341	1515.5	2.7	19.69	0.024
3282	1488.7	2.8	19.34	0.025
3245	1471.9	3	19.12	0.026

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

Peso= 2.1 Kg

L= 114mm

d= 9.9 Cm

A= 76.97 Cm^2

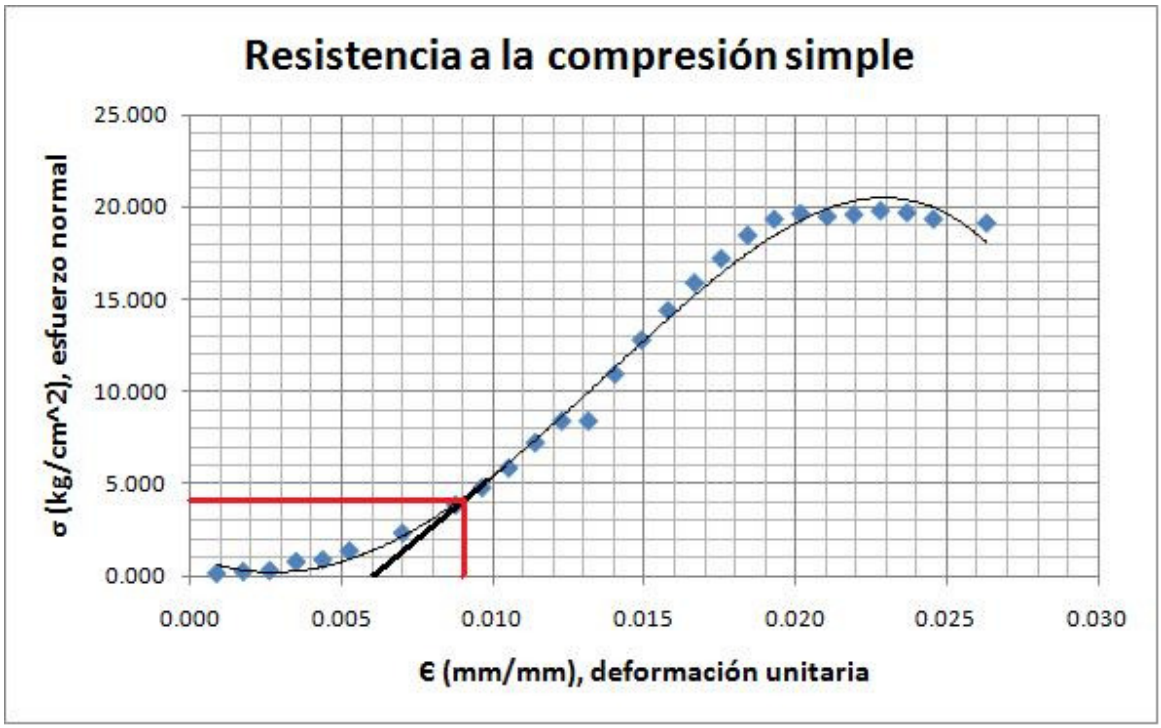

Figura 7. Curva esfuerzo deformación del espécimen de 4% a los 7 días de curado.

5% de cemento a siete días de curado

5% A SIETE DIAS				
P		ΔL	σ	Є
Lbs	Kg	mm	Kg/Cm^2	
22	10.0	0.1	0.13	0.001
41	18.6	0.2	0.24	0.002
132	59.9	0.3	0.78	0.003
177	80.3	0.5	1.04	0.004
241	109.3	0.8	1.42	0.007
295	133.8	1	1.74	0.009
345	156.5	1.2	2.03	0.011
355	161.0	1.3	2.09	0.011
395	179.2	1.4	2.33	0.012
427	193.7	1.5	2.33	0.013
414	187.8	1.6	2.44	0.014
641	290.8	1.7	3.78	0.015
745	337.9	1.8	4.39	0.016
868	393.7	1.9	5.12	0.017
1005	455.9	2	5.92	0.018
1186	538.0	2.1	6.99	0.018
1332	604.2	2.2	7.85	0.019
1514	686.7	2.3	8.92	0.020
1741	789.7	2.4	10.26	0.021
1914	868.2	2.5	11.28	0.022
2250	1020.6	2.6	13.26	0.023
2432	1103.1	2.7	14.33	0.024
2732	1239.2	2.8	16.10	0.025
3068	1391.6	2.9	18.08	0.025
3318	1505.0	3	19.55	0.026
3468	1573.1	3.1	20.44	0.027
3495	1585.3	3.2	20.60	0.028
3523	1598.0	3.3	20.76	0.029
3445	1562.6	3.4	20.30	0.030

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

Peso= 2.1 Kg

L= 114mm

d= 9.9 Cm

A= 76.97 Cm^2

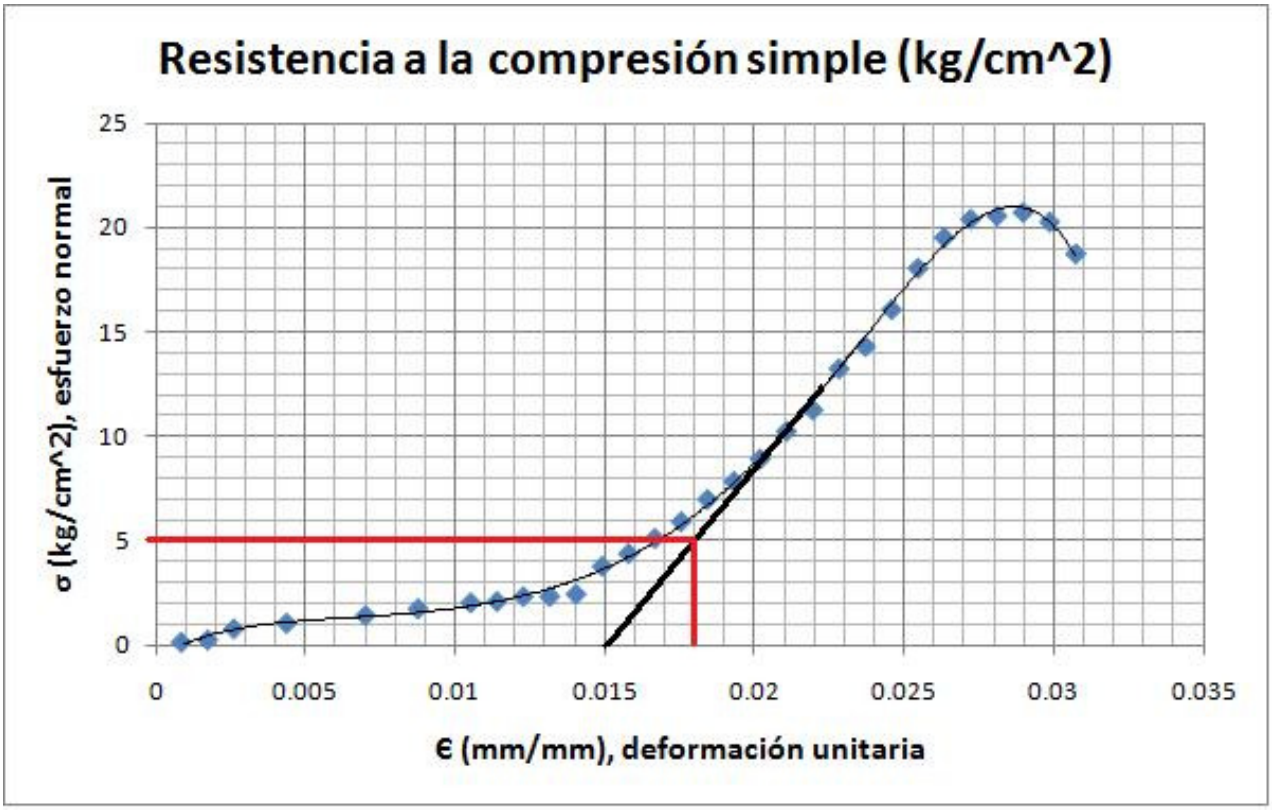

Figura 8. Curva esfuerzo deformación del espécimen de 5% a los 7 días de curado.

7% de cemento a siete días de curado

7% A SIETE DIAS				
P		ΔL	σ	Є
Lbs	Kg	mm	Kg/Cm^2	
32	14.5	0.1	0.19	0.001
191	86.6	0.2	1.13	0.002
336	152.4	0.4	1.98	0.003
364	165.1	0.5	2.15	0.004
418	189.6	0.7	2.46	0.006
518	235.0	0.8	3.05	0.007
614	278.5	0.9	3.62	0.008
705	319.8	1	4.15	0.009
823	373.3	1.1	4.85	0.010
945	428.6	1.2	5.57	0.010
1077	488.5	1.3	6.35	0.011
1277	579.2	1.4	7.53	0.012
1477	670.0	1.5	7.53	0.013
1732	785.6	1.6	10.21	0.014
2073	940.3	1.7	12.22	0.015
2386	1082.3	1.8	14.06	0.016
2818	1278.2	1.9	16.61	0.017
3323	1507.3	2	19.58	0.017
3723	1688.7	2.1	21.94	0.018
4136	1876.1	2.2	24.37	0.019
4564	2070.2	2.3	26.90	0.020
4850	2199.9	2.4	28.58	0.021
5041	2286.6	2.5	29.71	0.022
5227	2370.9	2.6	30.80	0.023
5377	2439.0	2.7	31.69	0.023
5564	2523.8	2.8	32.79	0.024
5677	2575.0	2.9	33.46	0.025
5714	2591.8	3	33.67	0.026
5745	2605.9	3.1	33.86	0.027
5764	2614.5	3.2	33.97	0.028
5659	2566.9	3.3	33.35	0.029
5541	2513.4	3.5	32.65	0.030

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

Peso= 2.115 Kg

L= 115mm

d= 9.9 Cm

A= 76.97 Cm^2

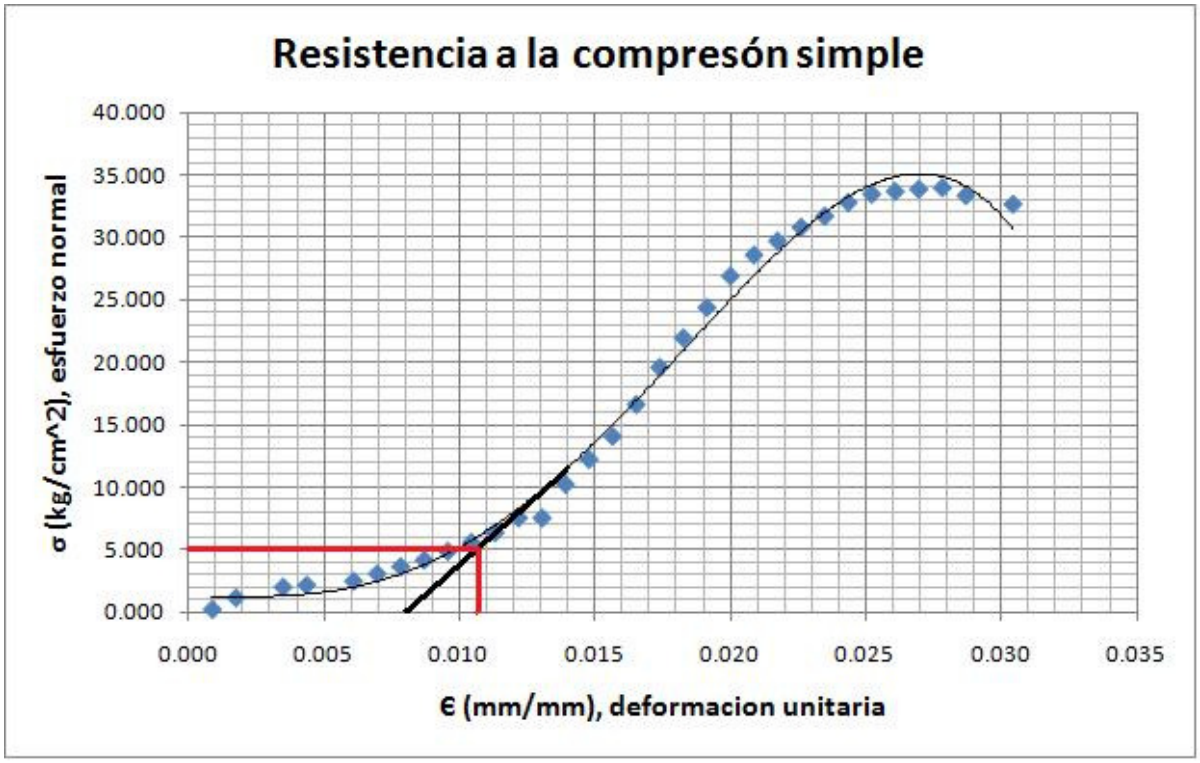

Figura 9. Curva esfuerzo deformación del espécimen de 7% a los 7 días de curado.

BIBLIOGRAFIA:

- Braja M. Das. (2001). Fundamentos de ingeniería geotécnica.: Thomson Learnig.

- Fernández Loaiza, Carlos. (1982). Mejoramiento y estabilización de suelos.: Limusa.

- Fuente Lavalle, Eduardo de la. (1995). Suelo-cemento: sus usos, propiedades y aplicaciones.: IMCYC.

- Paúl H. Wright. (1999). Ingeniería de Carreteras.: Limusa

- Rico Rodríguez, Alfonso. (2005). La ingeniería de suelos en las vías terrestres.: Limusa

- Martinez Inzunsa, Moisés y Sauceda Garcia, Ramiro A. (2011). Aplicación del método de estabilización con cemento de la asociación de cemento Pórtland (P.C.A.) a un suelo arcilloso del fraccionamiento los misioneros de Cd. Obregón Sonora.: Tesis del ITSON

- Juárez Badillo, Eulalio & Rico Rodríguez Alfonso. (2002). Mecánica de suelos.: Limusa.

- http://www.imcyc.com/ct2008/mar08/ingenieria.htm