

**Resistencia a la
abrasión
superficial de
un suelo no
cohesivo
estabilizado con
cemento.**



Abstract

In this document there is a proposal for a methodology to evaluate a soil-cement, and its resistance to abrasion. In order to do that, it is going to be use the criteria laid down in standards INTE 06-02-15-07 (Cobblestones Abrasion Resistance test) and ASTM C 944-99 (Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method).

The material which is utilized is a material classified as A-1-a, not plastic and with 8% of the total weight of soil passing through the sieve # 200.

For evaluating the resistance to the compressive, three specimens were prepared to test at 7, 14 and 28 days and for the following percentages of cement: 4, 6, 8, 10 and 12%. According to the results it was found that this resistance increases with the age and with the cement content of the mixture.

Weathering resistance was also evaluated for each one of the above percentages of cement by the standard ASTM D 559-03 (Repeated wetting and drying compacted soil-cement mixtures). According to this test it was demonstrated that the carrying values of weight loss in the samples, decreases when increasing the cement content.

Under the standard INTE 06-02-15-07 (Cobblestones Abrasion Test), the results for the abrasion resistance show a random pattern of behavior that prevent establishing the relationship of this property, with age and the cement content of the mixture.

The results obtained in the abrasion test with the standard ASTM C 944-99 (Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method) show that for a soil-cement, the weight loss due to the action of abrasion decreases when increasing the cement content of the mixture.

It was defined a theoretical percentage of stabilization for this type of soil in 8%, in order to start field tests of this material.

Palabras claves: Suelo-cemento, especificaciones de los materiales, resistencia a compresión, resistencia al intemperismo, resistencia a la abrasión.

Resumen

En este trabajo se propone una metodología de trabajo con el fin de evaluar en un suelo-cemento, su resistencia a la abrasión. Se propone para este fin utilizar los criterios planteados en las Normas INTE 06-02-15-07 (Resistencia a la abrasión en adoquines) y ASTM C 944-99 (Resistencia a la abrasión en superficies de concreto y de mortero).

El material utilizado es un material clasificado como A-1-a, no plástico y con un 8% del peso total del suelo pasando a través del tamiz de la malla #200.

Para evaluar la resistencia a la compresión, se elaboraron tres probetas para fallar a los 7, 14 y 28 días y para los siguientes porcentajes de cemento: 4, 6, 8, 10 y 12%. Con las pruebas se comprobó que esta resistencia aumenta con la edad y con el contenido de cemento de la mezcla.

La resistencia al intemperismo se evaluó también para cada uno de los porcentajes de cemento anterior mediante la Norma ASTM D 559-03 (Ensayo ciclos de saturación-secado). Con esta prueba se logró demostrar que los valores registrados de pérdida en peso de las probetas, disminuye al aumentar el contenido de cemento.

Según la Norma INTE 06-02-15-07, los resultados obtenidos para la resistencia a la abrasión muestran un patrón de comportamiento aleatorio que impide establecer la relación que guarda esta propiedad, con la edad y el contenido de cemento de la mezcla.

Los resultados obtenidos en la prueba de abrasión con la Norma ASTM C 944-99 demuestran que para un suelo-cemento, la pérdida en peso debida a la acción de la abrasión disminuye al aumentar el contenido de cemento de la mezcla.

Se define un porcentaje teórico de estabilización con cemento para este tipo de suelo de 8%, con el fin de empezar con las pruebas de campo de este material.

Resistencia a la abrasión superficial de un suelo no cohesivo estabilizado con cemento.

JOSÉ MANUEL FONSECA CHACÓN

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Julio del 2010

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

PREFACIO.....	2
RESUMEN EJECUTIVO.....	3
INTRODUCCION	6
MARCO TEÓRICO	8
METODOLOGÍA	16
RESULTADOS	25
ANALISIS DE RESULTADOS.....	54
CONCLUSIONES	61
RECOMENDACIONES.....	62
APENDICES	63
ANEXOS	64
REFERENCIAS	65

Prefacio

La Red Vial de Costa Rica está compuesta por alrededor de 35820 Km de vías. De este total, hay 8083 Km que se encuentran asfaltados, existen unos 24067 Km en lastre y el resto, no está clasificado. Toda esta red vial se encuentra bajo la administración de entidades estatales como CONAVI, MOPT y las Municipalidades (Sitio Web CONAVI,2010). Según estos datos, más de un 67% del total de la red vial costarricense tiene su superficie de rodamiento en lastre.

Estos caminos son particularmente sensibles a las condiciones climatológicas, especialmente durante la época de invierno, al degradarse aceleradamente por el efecto de la erosión y abrasión que provoca el agua superficial y las condiciones de uso por mencionar algunas causas. Esta situación requiere que año tras año, se dé una importante inversión estatal para mantener una buena condición de funcionamiento en estas vías.

Es aquí donde nace la necesidad de evaluar de qué forma es posible lograr mejorar este tipo de vías, mediante el uso de algún método o sistema que permita una adecuada condición de transitabilidad a lo largo del tiempo, sin que sea necesario realizar una inversión tan fuerte como sería el asfaltado de éstas. Estabilizar el suelo con cemento representa una de las propuestas más atractivas para solucionar dicho problema, debido a que se puede emplear prácticamente cualquier tipo de suelo y representa una opción viable en el aspecto económico en comparación con el asfaltado. El problema radica en que, aunque se pueda estabilizar el suelo con la adición de cemento en cantidades apropiadas, el material resultante presenta un comportamiento similar al del lastre compactado en cuanto a que manifiesta, en muchísima menor proporción, cierta sensibilidad a la combinación de los agentes degradantes antes mencionados. El objetivo principal de este proyecto es evaluar mediante

ensayos de laboratorio, la resistencia a la abrasión de un suelo no cohesivo estabilizado con cemento. A este material se le efectuaron pruebas con tal de determinar el comportamiento, al añadirsele diferentes porcentajes en peso de cemento en su composición, de algunas de sus propiedades mecánicas.

Se evaluaron la resistencia a la compresión, la resistencia al intemperismo bajo la Norma ASTM D 559 y a la abrasión utilizando dos métodos; la prueba de abrasión con la máquina colombiana para adoquines según la normativa INTE 06-02-15-07 y la prueba para abrasión en superficies de concreto y de mortero con la Norma ASTM C-944.

Gracias a todos los profesionales del CIVCO, profesores y asistentes, por toda la colaboración prestada de manera desinteresada, también por todo su trabajo. Gracias por la especial atención y el esmero en tratar de solucionar las dudas, así como también, por todas las gestiones realizadas con la única razón de que se pudiera contar con todos los recursos para llevar a buen puerto este proyecto.

Gracias al LANANME por la atención recibida y por el trato especial del que fue sujeto, especialmente por parte de la Ingeniera Ana Lorena Monge.

Gracias al señor Jorge Solano Jiménez, por su valiosa guía durante este proyecto y por todas las recomendaciones realizadas.

Gracias a Dios, por ponerlos a todos en mi camino.

Resumen ejecutivo

Este proyecto tiene como objetivo principal proponer una metodología de trabajo, con el fin de evaluar la resistencia a la abrasión y otras propiedades mecánicas de un suelo-cemento, formado por la estabilización con cemento Portland de uso general, en un suelo no cohesivo.

La idea nace de la necesidad de proponer una respuesta al problema del deterioro que sufren los caminos de lastre, principalmente durante la época de invierno.

Para ello se plantea como alternativa, la estabilización de ese tipo de caminos con cemento Portland, lo cual, aunque inicialmente signifique una alternativa de mayor costo, las ventajas obtenidas a mediano y largo plazo son muchísimo mayores que con el lastreo de caminos. Como ejemplo de esto se puede mencionar el escaso mantenimiento que requiere un pavimento de suelo-cemento en comparación con un pavimento de lastre.

El inconveniente radica en que en algunos casos, la experiencia tenida con el suelo-cemento y su uso como superficie de rodamiento en pavimentos, ha demostrado que el suelo-cemento tiene cierta tendencia al deterioro cuando se da la combinación de la aplicación de las cargas y la presencia de agua superficial en el camino.

Esta situación ha sido poco estudiada, por ello no se han establecido especificaciones técnicas para promover la construcción de este tipo de proyectos empleando el material de suelo-cemento, según especificaciones que promuevan el buen desempeño del material en las condiciones de funcionamiento de cada proyecto.

La idea con este trabajo es definir una metodología que permita relacionar el comportamiento de la resistencia a la abrasión del material con el contenido de cemento y la edad de la mezcla.

El suelo estudiado, es un material cuyo tamaño máximo de partículas ronda las 2", con presencia de cantos rodados. El suelo es no plástico, de color café claro, con un 48% del peso total del material retenido en la malla #4, con presencia de menos de un 9% de limo. Presenta una curva granulométrica continua (Ver gráfico 1) con presencia de partículas de todos los tamaños. Según la Norma ASTM D 3282 (Clasificación de suelos y mezclas de agregados para ser utilizados en la construcción de carreteras), el suelo se clasifica como un suelo tipo A-1-a.

La absorción de la parte fina del suelo es de un 7.2% aproximadamente y para la parte gruesa del suelo fue cercano a 2.4%.

Con la prueba Proctor modificada se prepararon todas las 165 probetas utilizadas en los distintos ensayos realizados.

Para determinar mediante el ensayo Proctor la relación entre la densidad máxima del suelo con la humedad óptima para cada mezcla, se evaluaron mezclas de suelo con los siguientes porcentajes de cemento 4, 6, 8, 10 y 12%, según la Norma ASTM D 558-03.

Los resultados obtenidos en esta prueba, son los siguientes pares ordenados de números, correspondiendo a las mezclas con 4, 6, 8, 10 y 12% de contenido de cemento respectivamente. El primer número dentro de cada paréntesis, corresponde a la densidad lograda en la probeta, el segundo número corresponde a la humedad óptima: (2192.54 kg/m³, 8.54%); (2161.81 Kg/m³, 9.0); (2181.27 kg/m³, 8.86%); (2169.1 kg/m³, 7.61%); (2161.63 kg/m³, 7.2%).

Para evaluar la resistencia a la compresión del suelo-cemento, se elaboraron tres probetas para fallar a los 7, 14 y 28 días para cada uno de los porcentajes de cemento antes citados.

Para la falla, se coronaron las probetas con una mezcla compuesta por dos partes de cemento por una parte de yeso.

Las probetas se fallaron en una máquina Versa Tester, con una velocidad de aplicación de carga de 1mm/min, según se establece en la Norma ASTM D 1633-00 (Falla a compresión de especímenes de suelo-cemento).

Los resultados en compresión promedios, obtenidos para las probetas falladas a los 7 días, para los contenidos de cemento de 4, 6, 8, 10 y 12% son respectivamente 31.81 kg/cm², 43.71 kg/cm², 48.35 kg/cm², 49.56 kg/cm² y 60.08 kg/cm².

Para la falla realizada a los 14 días, los promedios obtenidos para las mezclas con cada porcentaje de cemento fueron 33.51 kg/cm², 44.41 kg/cm², 56.25 kg/cm², 64.69 kg/cm² y 77.85 kg/cm² respectivamente.

Asimismo, los promedios calculados para los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión a los 28 días, para los contenidos de cemento de 4, 6, 8, 10 y 12% respectivamente son los siguientes: 40.79 kg/cm², 51.09 kg/cm², 76.20 kg/cm², 80.72 kg/cm² y 84.32 kg/cm².

Como se puede apreciar, la tendencia de los resultados se comporta según lo que se predice en la teoría, con respecto del comportamiento de esta propiedad, en cuanto a que esta resistencia aumenta con la edad y con el contenido de cemento para una misma mezcla de suelo-cemento.

Los requisitos mínimos, establecidos en el manual vigente de Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos, Carreteras y Puentes de Costa Rica (CR-77) y en el manual CR-2002 referido a la resistencia a la compresión para materiales similares, fueron superados por todas las mezclas evaluadas.

La prueba de ciclos de saturación-secado se llevó a cabo utilizando como base el procedimiento contenido en la norma ASTM D 559-03, en probetas con los siguientes porcentajes de cemento 4, 6, 8, 10 y 12%. Al efectuarse la prueba, las probetas deben tener 7 días de preparadas, debido al proceso de curado de la mezcla.

Durante la prueba, se someten las probetas a 12 ciclos para evaluar el comportamiento cuando se ven sometidas a los cambios volumétricos, tanto de expansión como de contracción. Los resultados se reportan como un porcentaje de pérdida de peso de la probeta, ocasionado al frotar por la superficie de la probeta, un cepillo con cerdas de láminas de acero (Ver figura 4).

Los promedios de los porcentajes de pérdida de peso al finalizar los 12 ciclos, calculados para las mezclas con los siguientes contenidos de cemento 4, 6, 8, 10 y 12%, son los siguientes: 11.71%, 4.37%, 1.97%, 2.58% y 1.63% respectivamente.

Como se puede apreciar, la pérdida en peso de las probetas manifiesta una tendencia decreciente al aumentar el contenido de cemento de la mezcla. Esto se da en casi todos los casos estudiados, salvo en la mezcla con un contenido de cemento igual a 10%, donde se registró una pérdida mayor que la de las probetas con un contenido de cemento de 8%, pues pesó un factor externo que se explica con cierta claridad en el capítulo de Análisis de Resultados.

Tomando en cuenta un criterio contenido en la Norma ASTM D 559-03 (Ensayo ciclos de saturación-secado para mezcla de suelo-cemento), se compararon los resultados con los valores referencia aportados por la norma para un suelo A-1-b, teniéndose que descartar las probetas con un contenido de cemento de 4%, porque presentaron un porcentaje de pérdida promedio muy superior al estimado en la Norma, tomando en cuenta la mayor cantidad de energía aplicada durante la compactación de estos especímenes. Con este panorama, los ensayos de abrasión se plantearon para evaluar las mezclas con los siguientes contenidos de cemento 6, 8, 10 y 12%.

Se prepararon probetas para fallar en dos procedimientos distintos: uno basado en la Norma ASTM C 944-99, que evalúa el efecto de la abrasión en superficies de concreto y de mortero, y la otra, siguiendo los lineamientos planteados en la Norma INTE 06-02-15-07, para evaluar la resistencia a la abrasión de adoquines.

Los resultados obtenidos con la prueba ASTM C 944-99 se reportan como un porcentaje de pérdida de peso en la probeta, debido a la acción ejercida por un rodillo cortador giratorio sobre una superficie no aserrada, durante tres ciclos con una duración aproximada de dos minutos por cada uno. Es importante mencionar que durante esta prueba, se aplicó una carga de 98.1 N sobre el eje que contenía el rodillo cortador, tal y como se solicita en la Norma.

Se fallaron un total de cinco probetas para cada mezcla, para fallar tanto a los 7 como a los 28 días.

Los resultados promedio obtenidos de pérdida de peso, expresada como porcentaje,

para las mezclas con contenido de cemento igual a 6, 8, 10 y 12% son los siguientes: 2.37, 1.13, 0.62 y 1.63% respectivamente.

A los 28 días, los resultados promedio obtenidos para cada una de las mezclas son los siguientes: 1.62, 0.70, 0.68 y 0.52% respectivamente.

La tendencia de estos datos expresa que la resistencia a la abrasión, evaluada con este método, aumenta tanto con la edad como con el contenido de cemento de la mezcla.

Los datos obtenidos por medio de la Norma INTE 06-02-15-07 (Resistencia a la abrasión en adoquines) manifiestan un comportamiento aleatorio, por lo cual es muy difícil deducir un patrón de comportamiento para este grupo de datos.

Los resultados obtenidos con esta metodología de ensayo se expresan como una longitud de huella resultante I_h , la cual según los parámetros establecidos por la Norma, se establece el rechazo o la aceptación de ésta.

Se evaluaron un total de siete probetas para cada porcentaje de cemento, para fallar tanto a los 7 como a los 28 días.

Los resultados promedio obtenidos en la falla a los 7 días, expresados como longitud de huella en milímetros, son los siguientes: 19.88, 22.95, 21.42 y 20.90 mm. Estos resultados corresponden respectivamente, a las mezclas de suelo-cemento con los contenidos de cemento iguales a 6, 8, 10 y 12%.

A los 28 días, los resultados promedio obtenidos para la longitud de huella en las probetas fueron los siguientes: 20.99, 21.67, 20.55 y 20.79 mm, correspondientes a cada mezcla de suelo-cemento preparada.

La Norma establece un rango donde la huella se considera como aceptable, cuando corresponde al valor de 20 a 23 mm con una tolerancia de +/- 1mm.

Aquí los resultados no se pueden analizar con base en los promedios, ya que con el criterio utilizado, se evalúa a cada espécimen de la muestra por separado.

Debido a la metodología empleada, estos datos no son concluyentes, pues al tomar los datos hay una gran variabilidad de éstos, producto del proceso de elaboración de las probetas, así como en la etapa de medición y valoración de las huellas producidas en las probetas, por el sistema de chorro de arena y disco.

A raíz de estas pruebas, se hace la recomendación de evaluar en este mismo ensayo, probetas que sean moldeadas de acuerdo con el tamaño adecuado, con el fin de evitar el aserrado de éstas.

También se plantea la necesidad de construir tramos de prueba, con el fin de comparar los resultados obtenidos en el laboratorio contra el comportamiento en sitio del material.

De manera experimental, se recomienda utilizar un 8% de contenido de cemento para este tipo de suelo, para estabilizarlo de manera exitosa para que sea utilizado en superficies de rodamiento para pavimentos. Serán las experiencias de campo, las que permitan determinar a ciencia cierta, cuál es el comportamiento del material en las condiciones reales particulares de uso.

Introducción

La historia del suelo-cemento es tan antigua como la del concreto mismo. Tanto los ingleses como los norteamericanos coinciden con que en 1917 se realizó el primer uso de este material. Probablemente por la falta de experiencia y debido al estado de desarrollo de las técnicas de construcción en ese momento, este material no tuvo éxito. Fue hasta 1932, cuando el Departamento de Caminos Estatales de Carolina del Sur de Estados Unidos de América, dio un impulso más científico al estudio del suelo-cemento y desde entonces, el desarrollo de su tecnología se ha enfocado principalmente en la construcción de caminos, siendo la Asociación del Cemento Portland (PCA) en los Estados Unidos de América (E.U.A), la principal promotora del uso de este material. Con sus publicaciones, esta técnica se logró difundir internacionalmente a países como Argentina, Inglaterra y Alemania.

No fue sino hasta después de la Segunda Guerra Mundial que E.U.A junto con Inglaterra desarrollaron la tecnología moderna del suelo-cemento. Actualmente, países como India, Brasil y Colombia cuentan con amplios programas para la aplicación de esta técnica, no sólo en la construcción de caminos, sino también en la construcción de viviendas de interés social (Avitia R., 1972).

Prácticamente, cualquier suelo puede ser estabilizado con cemento, la diferencia radica en que los porcentajes de cemento por añadir son distintos según sea el tipo y la naturaleza del suelo que se desee estabilizar. Por ejemplo, generalmente, los suelos finos y contaminados con materia orgánica requieren que se les agregue un mayor porcentaje de cemento en comparación con un suelo granular sin contaminación de materia orgánica. Los requerimientos mínimos para valorar la calidad del material se relacionan con la resistencia a la compresión generalmente, pero también hay pruebas que determinan la durabilidad de este material. En este sentido, las pruebas más utilizadas son la de ciclos de saturación-secado y la de ciclos de congelamiento-descongelamiento.

En la práctica, se sugiere que cuando se realiza la construcción de un suelo estabilizado con cemento, es necesario proveerle de una capa superficial de protección, que ayude a prevenir el desgaste prematuro de ésta, producido por el efecto de las condiciones climatológicas y de uso.

Al respecto, el manual vigente de Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos, Carreteras y Puentes de Costa Rica (CR-77) estipula que cuando se construye una base estabilizada, posteriormente a su construcción, se le debe impregnar con un riego de material bituminoso.

Con base en esta situación, el uso de mezclas de suelo-cemento como superficie de rodamiento, no ha tenido mucha trascendencia, debido a que no se han efectuado los estudios pertinentes con el fin de buscar las condiciones óptimas de la mezcla, las cuales permitan establecer los parámetros y las especificaciones técnicas necesarias para promover el uso de este material como superficie de rodamiento.

La técnica del suelo-cemento podría convertirse en una alternativa económicamente viable para ser utilizado en el mantenimiento de las rutas de lastre, aunque el uso de ésta requiera de una inversión inicial un poco mayor a la actual, el desembolso es significativamente menor, si se compara con la inversión necesaria para realizar el asfaltado de estas vías.

Hacia esa dirección se enfoca este proyecto, cuyo **objetivo general** es el siguiente:

- Determinar mediante ensayos de laboratorio, la resistencia a la abrasión superficial de un sistema suelo-cemento en diferentes condiciones estructurales y de uso.

Para lograr este objetivo y ante las limitaciones propias del proyecto, se estableció otra serie de **objetivos más específicos**:

- Recopilar información acerca de las normas nacionales e internacionales que guarden relación con este tipo de ensayos.

- Realizar ensayos en el laboratorio con el fin de obtener las propiedades físicas y mecánicas del suelo analizado.
- Elaborar curvas de comportamiento para la mezcla de este material con diferentes porcentajes de cemento y establecer la relación entre el % de cemento y la resistencia a compresión del material.
- Establecer la relación entre el porcentaje de cemento y la resistencia a la abrasión del suelo-cemento, mediante la realización de pruebas en el laboratorio utilizando alguna normativa apropiada, aunque esta normativa sea para ensayar otra clase de material.
- Elaborar curvas de comportamiento para la mezcla de este material con diferentes porcentajes de cemento y establecer la relación entre el % de cemento y la resistencia a la abrasión del material.

Al respecto, se definió que las normas de abrasión según las cuales se someterán los especímenes de prueba son la Norma ASTM-C944 (Resistencia a la abrasión para superficies de mortero y de concreto utilizando un disco de corte giratorio) y la Norma INTE 06-02-15-07 (Método de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión de materiales de pisos y pavimentos, mediante arena y disco metálico ancho).

La idea es evaluar con estas normas la resistencia a la abrasión del suelo-cemento, utilizando los criterios expresados en dichas normas. Básicamente, con ayuda de estos métodos de prueba, se pretende determinar si el suelo ensayado puede ser o no utilizado como superficie de rodamiento y analizar también el comportamiento de éste cuando se varían los porcentajes de cemento en la mezcla.

Cabe destacar entre las limitaciones de este proyecto, que hasta el presente, fue imposible tener acceso a investigaciones previas sobre este tema en específico, lo cual generó una serie de obstáculos sobre el establecimiento de la metodología de trabajo por seguir.

Otro punto necesario por tomar en cuenta dentro de las limitaciones del proyecto, es que las pruebas se realizaron para un único tipo de suelo, correspondiendo éste a un suelo clasificado como granular tipo A-1a no plástico según la Normativa ASTM para la identificación y clasificación de suelos.

También se puede mencionar que no fue posible construir tramos de prueba con la intención de que se pudiera establecer la relación de los resultados obtenidos en el laboratorio, con el comportamiento del material colocado en sitio.

Comentando un poco sobre la disponibilidad de equipos para efectuar las pruebas, es importante mencionar que sólo se pudieron efectuar estas dos pruebas, no sólo por el limitante económico, sino porque no fue posible tener acceso a efectuar una prueba de abrasión al material evaluado con algún otro ensayo disponible, distinto de los que se propusieron en este trabajo.

Marco teórico

En este capítulo se definen algunos conceptos básicos con la intención de familiarizar al lector con la naturaleza del suelo-cemento.

En primer lugar se define suelo de manera general como el producto de la desintegración de la roca, causada por el ataque de agentes atmosféricos, químicos y mecánicos. (Avitia, R., 1972)

La estabilización de suelos consiste en el mejoramiento de las resistencias mecánicas y procurar la permanencia de éstas a través del tiempo.

Entre los métodos de estabilización comúnmente utilizados se puede mencionar los siguientes:

- Mecánicos (compactación, vibración).
- Granulométricos (adición de material fino o grueso o ambos en cantidades definidas).
- Químicos: (adición de sales, cementos orgánicos e inorgánicos).
- Físico-químicos: (adición de resinas, asfaltos).

El suelo-cemento se puede definir como una mezcla homogénea y altamente compactada de cantidades adecuadas de suelo pulverizado, cemento y agua. A medida de que se da la hidratación del cemento, se va formando un material durable con propiedades mecánicas adecuadas para que sea empleado en la construcción de carreteras. Generalmente, es el producto de la combinación de los métodos de estabilización mecánicos, químicos y frecuentemente granulométricos. (Avitia, R., 1972)

La Asociación de Cemento Portland de los E.U.A propone la siguiente definición: "El suelo-cemento es una mezcla íntima de suelo, convenientemente pulverizado, con cantidades determinadas de agua y cemento, la cual se compacta y cura con el fin de obtener una mayor densidad del material. Cuando sucede la hidratación del cemento, la mezcla se torna en un

material duro, durable y rígido". (De la Fuente, E, 1995)

Algunos importantes investigadores recalcan la necesidad de llamarle al suelo-cemento como suelo tratado con cemento, entre otras razones, se menciona que, aunque el término sea más largo, evita ambigüedades en la definición, es de connotación amplia y permite clasificarlo según sea el tipo de suelo, clase de tratamiento y de cemento utilizado. (De la Fuente, E, 1995)

La selección del agente estabilizador de un suelo podría realizarse a partir de la información obtenida del análisis granulométrico y al determinar los límites de Atterberg.

Los límites de Atterberg constituyen un método que busca describir la consistencia de los suelos de grano fino con contenidos de agua variables. Este método fue desarrollado en 1900 por Albert Mauritz Atterberg. Sus observaciones lograron clasificar de manera arbitraria, la naturaleza del comportamiento del suelo basado en el contenido de humedad, en cuatro estados básicos denominados sólido, semisólido, plástico y líquido. El contenido de agua, en porcentaje, donde el cambio del estado sólido al estado semisólido tiene lugar es definido como el límite de contracción. Ahora bien, el punto donde se da el cambio del estado semisólido al estado plástico es llamado límite plástico y al límite líquido se le conoce como el punto donde se da el cambio del estado plástico de un suelo al estado líquido. (Das, B., 2001)

Por otra parte, un procedimiento para la selección del estabilizador para un suelo fue propuesto en 1979 por la Administración Federal de Carreteras (Federal Highway Administration) de los E.U.A y funciona de la siguiente manera. (Moya, L., 2007)

Primero se realiza el análisis granulométrico del suelo, el cual consiste en tamizar una muestra representativa del suelo a través de una serie de tamices dispuestos en orden decreciente según el tamaño de la abertura

que caracteriza a cada uno de éstos y se determina su distribución de acuerdo con el tamaño de sus partículas, identificando los porcentajes de suelo que pasan a través de cada tamiz. Posteriormente, se determinan los límites de Atterberg para el espécimen de suelo estudiado.

Con esta información se identifica el porcentaje de suelo, cuyas partículas pasan el tamiz de la malla #200. Si este porcentaje es menor que un 25%, se evalúa el índice de plasticidad IP del suelo. Si es menor a 10, el suelo puede ser estabilizado con cemento o por medio de una estabilización bituminosa. Si el IP es mayor a 10, se puede emplear la estabilización del suelo con cemento o con cal.

Cuando el porcentaje del suelo que pasa a través de la malla #200 es mayor a un 25%, se evalúa del mismo modo el índice de plasticidad IP del suelo. Si este valor es menor que 10, se puede emplear la estabilización con cemento.

Si el valor de IP es mayor que 10 pero menor que 30, se podría emplearse la estabilización con cemento, la estabilización bituminosa o la estabilización con cal.

Cuando el valor del índice de plasticidad del suelo es mayor a 30, se puede utilizar la estabilización con cemento o con cal. (Moya, L., 2007)

El método por utilizar está muy vinculado al tipo de suelo que se va a emplear, a las disposiciones de resistencia y durabilidad fijadas y, obviamente, a la economía de cada proyecto.

En general, el uso del método de estabilización con cemento empleando suelos finos y plásticos o con presencia de máximo de un 2% de materia orgánica en su composición, requieren de la adición de una mayor cantidad de cemento en comparación con suelos granulares. (Avitia, R., 1972)

La estructura interna del suelo-cemento se diferencia con respecto de la del concreto en que al contrario de éste, son las partículas del agregado las que rodean a las partículas de cemento. Se produce un aumento en la fricción del suelo, disminuye la plasticidad del suelo y la cohesión, esto durante el proceso de hidratación del cemento. Al final, se obtiene como producto una masa sólida. (Avitia, R., 1972)

Estudios petrográficos realizados a este material han encontrado que la estructura interna del suelo-cemento endurecido está formada por cadenas rígidas originadas por la cristalización de

los granos de cemento y por las partículas del suelo aglutinadas por este fenómeno. También se forman cadenas plásticas en los suelos finos, por aquellas partículas de arcilla donde la cristalización de los granos de cemento no las alcanzó. (Avitia R., 1972)

La reacción del cemento con los suelos granulares es similar a la que sucede con los agregados en concretos y morteros. La estructura se mantiene similar que la estructura obtenida con el suelo sin estabilizar, aunque se forman nuevos vínculos entre los granos del suelo, al ocupar las partículas del cemento el espacio libre, actuando como relleno entre las partículas de suelo.

En suelos finos, la reacción con el cemento proporciona un aumento en la resistencia debido a una rápida floculación y acercamiento de las partículas de arcilla o limo, se da la hidratación del cemento con el establecimiento de vínculos entre partículas y paquetes de ellos, así debido a la cristalización del carbonato de calcio con partículas de cemento que probablemente, durante el mezclado, se encontraban dispersas en el medio. (De la Fuente, E., 1995)

En suelos arcillosos, a medida que el cemento se va hidratando, se producen silicatos y aluminatos hidratados de calcio, hidróxido de calcio e iones de calcio, lo cual aumenta la concentración de electrolitos en el agua libre aumentando su pH ($\text{pH} > 7 \rightarrow \text{Sol. Alcalina}$). Luego se produce un intercambio iónico entre los iones de calcio y los minerales de la arcilla, ello da lugar a la floculación de los granos finos. A partir de aquí se generan enlaces muy fuertes que se producen debido a la cristalización de los granos de cemento y por las partículas de suelo aglutinadas por este fenómeno, se produce así un aumento en la fricción interna, en la cohesión y disminuye la plasticidad del suelo. (Cordero, M., 1991)

Con la adición de bajos porcentajes de cemento a mezclas de suelos arcillosos, se han obtenido en algunas ocasiones resultados que manifiestan una disminución en el valor de resistencia a la compresión, porque al añadirse cemento en poca cantidad, se produce un efecto de encapsulamiento de las partículas de arcilla sobre las partículas de cemento, mayores en tamaño, lo cual origina como consecuencia una estructura interna más débil incluso, que la del suelo sin estabilizar.

Estos son algunos datos interesantes al respecto: el tamaño de las partículas de cemento están en un rango comprendido entre 0.5 a 100 micras con una finura de 2800 cm²/gr. Para las arcillas, el tamaño de las partículas ronda las 2 micras y su finura puede estar alrededor de 10⁵ cm²/gr. De esta información se aprecia que en teoría, las partículas más pequeñas que corresponden a las arcillas rodearán los granos de cemento provocando que no todo el suelo reaccione con el cemento. (De la Fuente, E.,1995)

Clasificación de las mezclas de suelo-cemento.

La clasificación de las mezclas de suelo-cemento se realiza partiendo del grado de estabilización que se requiere de ellas, buscando siempre satisfacer determinadas especificaciones de resistencia y de durabilidad para un uso específico.

Existen cinco tipos de estabilización con cemento, definidos cada uno de acuerdo con el uso que se requiera de ellas, así como a la dosificación y a la clase de los materiales que se utilicen para producir la mezcla. Los tipos son: (Moya, L.,2007)

Suelo-cemento:

Es una mezcla que se define previamente con el objetivo de cumplir especificaciones mínimas necesarias de resistencia y de durabilidad que garanticen su buen funcionamiento. Es utilizada por ejemplo, en la construcción de bases, sub-bases y taludes de pavimentos, también se utiliza en cortinas, diques y vasos de represa o en elementos estructurales como tabiques prensados y otros similares utilizados en la fabricación de viviendas.

Mezcla de suelo granular y cemento:

Es una mezcla similar a la anterior, sólo que se utiliza cemento en menores proporciones. Esta mezcla se realiza con el fin de mejorar ciertas características del suelo como la capacidad de soporte, así como reducir los cambios volumétricos (expansión-contracción) y para reducir la plasticidad del suelo. Esta mezcla se utiliza como base en pavimentos rígidos y flexibles de rutas con órdenes de tráfico altos.

Este material es empleado para mejorar la subrasante, la base y subbase de un pavimento, esto contribuye a lograr una disminución de estas capas en la estructura del pavimento.

Suelo cohesivo de grano fino (limos y arcillas) mejorado con cemento:

Con la adición de cemento a este tipo de suelos, se busca reducir los cambios volumétricos del material y aumentar la resistencia del suelo.

Se utilizan dosificaciones relativamente pequeñas de cemento con el fin de modificar la plasticidad y la granulometría del material, además reduce la humedad excesiva lográndose un mayor grado de compactación del suelo. Es utilizado típicamente en el mejoramiento de capas de fundación (sub-rasantes).

Los controles en cuanto a resistencia y durabilidad de este tipo de material no son tan estrictos y su uso va enfocado a reducir la plasticidad del suelo y aumentar en cierto grado el valor de soporte del suelo.

Suelo-cemento plástico:

Es una mezcla íntima de suelo y cemento, donde se combinan con el agua suficiente para producir un tiempo de fraguado y una consistencia similar a la de un mortero de arena y cemento, la cual debe satisfacer requerimientos mínimos de resistencia y durabilidad. Este material se puede comparar con un concreto hidráulico pobre, sin embargo, en esta mezcla de suelo-cemento se utilizan agregados que no cumplen con las

especificaciones que requiere un concreto y además se emplea una menor cantidad de cemento. Se emplea para revestir canales, en taludes con una relación mayor a 5:1 y para controlar la erosión y es común que se empleen comúnmente suelos de tipo arenosos.

Grava-cemento:

Es comúnmente utilizado en pavimentos de tránsito pesado. Se adiciona cemento en bajas proporciones (3-6% por peso), pues lo que se busca es evitar la segregación del suelo durante la puesta en obra y reducir hasta cierto punto, los efectos destructivos del agua a largo plazo.

Algunas propiedades del suelo-cemento:

Antes de analizar algunas propiedades de las mezclas de suelo-cemento que permiten el uso de este tipo de material en la estructura de los pavimentos, conviene analizar los materiales que lo forman, con tal de definir algunas especificaciones mínimas que estos deben cumplir con el fin de obtener un buen suelo-cemento:

Agua:

El agua comprende en promedio del 10 al 20% por peso seco total de la mezcla, ya sea para suelos granulares o para suelos plásticos respectivamente. Entre sus funciones está que actúa como agente lubricante entre las partículas del suelo y ello logra un mejor acomodo entre ellas, produciendo una mayor densidad del material, así como también, hidratar al cemento con el fin de lograr una masa dura y resistente. Básicamente el agua que se debe emplear es aquella que se pueda beber. Esto es: el agua debe estar libre de cantidades perjudiciales de álcalis (presencia de cierto tipo de sales básicas originadas de metales alcalinos), ácidos o de materia orgánica. Del mismo modo, se podría utilizar agua salada siempre y cuando se demuestre que se encuentra libre de las sustancias antes mencionadas. (Avitia,R.,1972)

La cantidad de agua se determina tomando en cuenta criterios como la trabajabilidad y manejabilidad de la mezcla, la necesidad de reducir los agrietamientos excesivos y para alcanzar la compactación deseada con el equipo disponible. (De la Fuente,E.,1995)

Cemento Portland:

Este material comprende un 10% en promedio por peso total de la mezcla seca, pero los valores rondan entre un 2 a un 25% del peso seco de la mezcla. El uso de este compuesto está fijado por la economía de cada proyecto. Se considera en general, que cualquier tipo de cemento puede ser utilizado siempre y cuando cumpla con algunas especificaciones como la ASTM C-150, ASTM C-175 o la ASTM C-205. En cuanto a este material, se puede decir que los más utilizados son el cemento normal (tipo1) y el normal con aire incluido. (Avitia,R.,1972).

Existen trabajos de investigación que concluyen que el cemento Portland tipo 1 permite a la mezcla alcanzar una mayor resistencia que cuando se emplea cemento Portland tipo 2, pues el primero contiene una mayor cantidad de aluminato tricálcico y de sulfato de calcio. El uso de cemento Portland tipo 2 resulta más apropiado cuando se busca reducir los agrietamientos. En suelos granulares es común utilizar cementos expansivos con ese mismo fin.

En caso de que en el agua de la mezcla exista la presencia de sulfatos solubles en más de un 0.20% o donde el agua externa que pueda penetrar el suelo-cemento contenga más de 1500 p.p.m. de sulfatos, entonces es recomendable el empleo del cemento ASTM tipo V (5), que es el cemento que provee una alta resistencia al efecto de los sulfatos. (De la Fuente, E.,1995)

Suelo:

El suelo representa aproximadamente el 90% del peso seco total de la mezcla. Prácticamente cualquier tipo de suelo puede ser estabilizado con cemento sin importar que sean o no bien graduados, si se considera que la estabilización con cemento no depende de la fricción interna o de la cohesión del suelo, sino más bien de la

hidratación del cemento (Avitia,R.,1972). Las excepciones se encuentran en aquellos suelos que contengan un gran contenido de sales (zonas desérticas), materia orgánica y materiales delétereos. (De la Fuente, E., 1995)

Según la valiosa experiencia acumulada durante estos años, se puede decir que mientras más finos y más plásticos sean los suelos, requerirán mayor contenido de cemento para lograr endurecer satisfactoriamente. Para suelos granulares y menos plásticos requieren del empleo de porcentajes menores de cemento para lograr que endurezcan de manera satisfactoria. Tomando en consideración la presencia de materia orgánica, se tiene que para suelos con la misma granulometría y con similar plasticidad, la presencia de materia orgánica genera la aplicación de una mayor cantidad de cemento para producir resultados satisfactorios.

Mencionando la granulometría del suelo, se tiene que el agregado cuyo tamaño de las partículas ronda de 25 a 2 mm se conoce como agregado grueso. Este tipo de partículas aporta fricción, resistencia al impacto, resistencia al desgaste y dureza al conjunto.

Las partículas de suelo, cuyo tamaño se ubica entre los tamices 10 y 40, se conocen como arena gruesa y aportan fricción y dureza al material. Asimismo, las partículas, cuyo tamaño sea entre los tamices #40 y #200 se conocen como arena fina y su función está en producir el acuñamiento del material grueso.

Las partículas más finas como el limo y la arcilla actúan como relleno, se impide así el movimiento de las partículas más grandes. (Cordero, M.,1991)

Algunos investigadores coinciden en que el tamaño máximo de las partículas del suelo por estabilizarse no debe superar las 3" sin importar la graduación del suelo. No se recomienda que más de un 50% del material pase la malla #200, el límite líquido no debe ser mayor a 50 y su índice plástico debe ser menor a 25. Es recomendable no utilizar los suelos altamente compresibles y los muy plásticos.

La Asociación del Cemento Portland de los E.U.A propone que no más del 45% del material sea retenido en el tamiz de la malla #4, recomienda no utilizar suelos con muchas gravas o con más de un 15% de arcilla, la parte formada por limos y arcillas no debe superar en total un 45% de la masa del suelo y es deseable que el suelo tenga entre un 55 a un 80% de arenas.

En cuanto a los límites de suelo, la Asociación de Cemento Portland enfatiza que se deben descartar los suelos cuyas características sean $LL > 45$ y $LP > 20$. (De la Fuente,E.,1995)

Aditivos:

Se pueden emplear aditivos en las mezclas de suelo-cemento con el fin de mejorar o modificar algunas propiedades del material. Es utilizado como parte de un método de estabilización químico, que puede utilizarse en combinación con otros métodos de estabilización. (De la Fuente, E.,1995)

Existe una cantidad óptima de aditivo que producirá el mejor resultado. Los resultados más alentadores se han obtenido en la reducción del agrietamiento, en contrarrestar el ataque al material ante la presencia de sulfuros y para facilitar la manipulación del material durante el proceso constructivo. (De la Fuente, E.,1995)

Esto, generalmente se utiliza para mejorar la reacción existente entre el suelo y el agente estabilizador utilizado, así se logra un mayor grado de estabilización sin que sea necesario agregar una mayor cantidad del agente estabilizador al suelo. (Cordero,M.,1991)

Los aditivos más conocidos que se pueden utilizar son los siguientes:

-Cal hidratada: Utilizada como complemento en un suelo-cemento, donde exista presencia de materia orgánica, contribuyendo a mejorar la reacción del suelo con el cemento. Este material se utiliza cuando el suelo presenta una baja velocidad de fraguado o, cuando al agregársele cemento, aun presenta un bajo valor de resistencia a la compresión. Entre otras ventajas que se logran al emplear la cal hidratada está que se reduce la plasticidad del suelo, mejora la trabajabilidad de la mezcla y reduce los cambios volumétricos, en especial los que se refieren a la expansión.

-Cloruro de calcio: Con este aditivo se logra que suelos con gran presencia de materia orgánica endurezcan de manera satisfactoria. Los porcentajes utilizados varían en el rango de 0.3-0.5% por peso seco del material y los resultados obtenidos dependen del tipo de materia orgánica presente, como pueden ser almidones, azúcares, celulosa entre otros, que retardan el fraguado de la mezcla. (Cordero,M.,1991)

A continuación se mencionan el nombre y la función de otros aditivos que pueden ser empleados. (De la Fuente, E.,1995)

- Cemento Portland tipo IV: para reducir los agrietamientos (Cemento expansivo).
- Cal: como agente floculante.
- Fly-Ash (cenizas volantes) y carbonatos de sodio: como agentes reductores del calor de hidratación de la mezcla.
- Lignosulfato de calcio y ácido carboxílico hidroxilatado: Se utilizan para mejorar la liga entre capas de suelo-cemento.
- Ligno-sulfatos (Pozzolith 8): Se usan cuando la intención sea la de reducir el agua durante el mezclado del material.
- Sulfato de sodio, aluminatos y sales: como agentes expansivos que son utilizados para reducir el agrietamiento del material.
- Sales, silicatos e hidróxidos de sodio: como agentes selladores de superficie y como agentes endurecedores.

Después de haber estudiado un poco los componentes de las mezclas de suelo-cemento y de estudiar cómo se relacionan entre ellos, es necesario discutir algunas propiedades mecánicas del suelo-cemento, que le permiten el empleo en proyectos de infraestructura vial.

Las propiedades típicas del suelo cemento varían por diversos factores entre los que se pueden mencionar: (Cordero, M.,1991)

- Tipo y proporción del suelo, contenido de agua y cemento de la mezcla.
- Uniformidad y edad de la mezcla.
- Condiciones y tiempo de curado de la mezcla.
- Energía de compactación aplicada.

Las propiedades que permiten el uso del suelo-cemento en la estructura de pavimentos se pueden clasificar en dos tipos, las propiedades primarias que facilitan el uso de este material en carreteras y las propiedades secundarias, que favorecen la permanencia en el tiempo de las propiedades primarias logradas en el momento de la construcción. (Avitia,R.,1972)

A continuación se presenta una breve descripción del comportamiento esperado de algunas de las **propiedades primarias** del suelo-cemento:

Resistencia a la compresión:

En cuanto a esta propiedad, la experiencia ha demostrado que aumenta de valor con la edad y con el contenido de cemento de la mezcla para una misma clase de suelo, así como son determinantes el tiempo y la calidad del curado que tenga la mezcla. (Cordero,M.,1991)

Las mezclas de suelo-cemento en las que se emplean suelos gruesos presentan una mayor resistencia que la obtenida si se usa suelos finos, en igualdad de condiciones de edad y dosificación de cemento.

Los requisitos en cuanto a esta propiedad varían de un país a otro, siendo para muchos de éstos, la propiedad decisiva en cuanto a su uso como referencia de la calidad del material. La excepción se da en países como los E.U.A, que considera los criterios sobre la durabilidad de este material como decisivos. (Avitia,R.,1972)

Estudios realizados han revelado que el desarrollo de la resistencia en las mezclas de suelo-cemento posterior a los 28 días es mayor, si se compara con el del concreto normal. Para ilustrar esta afirmación por ejemplo; se tiene que la resistencia a la compresión a los 90 días puede andar cerca del rango de 1.4 a 2.6 veces mayor que la de los 28 días y con el paso de los años, esta puede llegar a ser entre 2.5 a 5 veces mayor que la resistencia obtenida a los 28 días. (Avitia,R.,1972)

Características del proceso de compactación:

Mediante la prueba Proctor es posible apreciar que, el grado de densificación de un suelo que se puede lograr a través del proceso de compactación, ello está íntimamente ligado a la cantidad de agua presente en el suelo al momento de ser compactado. Con la acción floculante originada por la presencia de cemento en la mezcla, se produce un aumento en la densidad obtenida, con una relación de humedad óptima específica mucho menor que la requerida para densificar al suelo sin presencia de cemento. (Cordero, M., 1991)

Resistencia a la flexión:

Esta propiedad aumenta con la edad y con el contenido de cemento en la mezcla. Algunos estudios realizados acerca de esta propiedad, revelaron que el valor de ésta podría representar un valor de 1/5 a 1/3 del obtenido en los ensayos en pruebas de resistencia a compresión inconfiada para este material.

La expresión que se presenta a continuación fue propuesta como una buena forma de aproximar el valor de esta propiedad después de numerosos ensayos realizados en el laboratorio y expone una forma de relacionar la resistencia con la flexión de un suelo-cemento con su resistencia a la compresión inconfiada para este material. (Cordero, M.,1991)

$$f_r \approx 0.37 * (f'c)^{0.88}$$

En donde: f_r : resistencia a flexión (kg/cm²)
 $f'c$: resistencia a compresión (kg/cm²)

Módulo de rotura:

Esta propiedad aumenta con la edad y con contenido de cemento. Es mayor en suelos gruesos que los finos. Se relaciona con la resistencia a compresión en una proporción que va de 0,18 a 0,45, correspondiente con suelos que manifiestan una alta resistencia a la compresión y aquellos de una baja resistencia a la compresión respectivamente.

Estudios realizados han mostrado resultados que permiten relacionar que el valor de esta propiedad a los 28 días aumenta de 1.1 a 2 veces con respecto del valor obtenido a los 7 días y para los 90 días, esta razón anda entre 1.5 a 2.7 veces el valor obtenido de esta propiedad a los 7 días. (Avitia,R.,1972)

Módulo de elasticidad:

Pruebas realizadas en el laboratorio revelan que el valor de esta propiedad se puede encontrar entre 30000 kg/cm² a 225000 kg/cm², siendo importante mencionar que el límite superior se encuentra relacionado con el módulo de

elasticidad obtenido en pruebas estáticas a flexión y para módulos de elasticidad dinámicos.

Asimismo, se debe mencionar que los valores menores se encuentran relacionados con suelos finos y su relación con la resistencia a la compresión se da según las siguientes proporciones, de 1:500 para suelos finos y de 1:3000 para suelos predominantemente gruesos. (Avitia,R.,1972)

Capacidad de soporte (CBR):

Este ensayo constituye un método empírico con el cual se obtiene un parámetro que permite evaluar el uso de este material según su capacidad de soporte, identificando el uso más acorde del material ya sea en subrasantes, subbases y bases para pavimentos. Algunos investigadores sostienen que para este tipo de material, esta propiedad no es de mayor relevancia debido a que por la adición de cemento, el material se endurece, y genera valores relativamente altos en esta prueba. (De la Fuente, E.,1995)

Resistencia al desgaste:

La experiencia obtenida con el tiempo revela que el suelo-cemento presenta una baja resistencia al desgaste, o sea, es un material susceptible al desgaste, siendo necesario tomar algunas medidas para protegerlo durante la puesta en obra. Por ejemplo, el manual vigente de Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos, Carreteras y Puentes de Costa Rica (CR-77) estipula que cuando se construye una base estabilizada, posteriormente a su construcción se le debe impregnar con un riego de material bituminoso.

Coefficiente de Poison:

Los resultados obtenidos al evaluar este parámetro presentan una gran variabilidad debido principalmente, a los distintos métodos utilizados para ensayar el suelo-cemento. Por ejemplo, en suelos granulares se han obtenido resultados que varían en el rango que va desde 0.1 a 0.2 para dicha propiedad; para suelos finos la variabilidad

de los resultados se ubica dentro del rango que va desde 0.15 a 0.35. (Cordero, M.,1991)

Factor de fatiga:

La aplicación de cargas en repetidas ocasiones, provoca que el suelo-cemento sea un material susceptible a fallar por fatiga. En este caso, la fatiga a flexión es el parámetro de mayor interés debido a que corresponde a la forma de solicitación de una estructura multicapa que caracteriza a los pavimentos. (Cordero, M.,1991)

Cambios volumétricos:

En cuanto a esta propiedad, se puede decir que el suelo-cemento está sujeto a sufrir cambios volumétricos en su estructura considerando algunas variables como lo son el tipo de suelo, los cambios de humedad, el grado de compactación logrado, la cantidad de cemento presente en la mezcla y a las condiciones de curado del material. En general, los cambios pueden ser ocasionados debido a expansiones o contracciones de la mezcla y son más evidentes en aquellas mezclas de suelos finos que en suelos de grano grueso. (Cordero, M.,1991)

El efecto de la reducción de los cambios volumétricos en las mezclas de suelo-cemento aumenta con la adición de porcentajes de cemento más altos en la mezcla y es muy notable en suelos de grano fino.

En suelos de grano grueso, los cambios volumétricos son prácticamente imperceptibles, sin embargo, un aumento en la cantidad de cemento en las mezclas con este tipo de suelos, provoca un aumento en las contracciones, generadas principalmente por una disminución del contenido de humedad de la mezcla.

Las expansiones en el suelo-cemento se encuentran ligadas a diferentes factores como el aumento de la humedad y en los cambios de temperatura. (Avitia,R.,1972)

La relación de los cambios volumétricos con el proceso de compactación se puede mostrar a través de un ejemplo, donde una mezcla de suelo-cemento compactada compuesta por un suelo fino va a presentar una expansión menor en comparación con la contracción si la compactación se realiza con una

humedad mayor a la humedad óptima de la mezcla, mientras que si la mezcla es compactada con una humedad menor a la humedad óptima, la expansión es mayor y la contracción menor. (Avitia,R.,1972)

Al respecto de las **propiedades secundarias** en un suelo-cemento se tiene lo siguiente:

Resistencia al intemperismo:

Básicamente se conocen dos métodos para evaluar dicha resistencia: mediante ciclos de saturación-secado y con ciclos de congelación-deshielo, propuestos ambos por la ASTM.

El interés de este tipo de pruebas radica en que expone cuál es el comportamiento de cualquier mezcla de suelo cemento al ser sometida a pruebas que provocan cambios volumétricos en ella, simulando hasta cierto punto, las condiciones de solicitación de estos materiales en condiciones normales de uso.

Algunos resultados obtenidos en el laboratorio revelan que en general, esta resistencia aumenta con la edad y con la cantidad de cemento que se emplee en la mezcla.

Resistencia a la absorción de agua:

Con el empleo de cemento se disminuye notablemente el poder absorbente del suelo pero en la práctica es necesario tomar medidas que protejan a este material contra la lluvia y la formación de charcos en la superficie. La solución para este tipo de problemas radica en dar un adecuado bombeo al material, aplicar algún tipo de tratamiento superficial que confiera de cierto grado de impermeabilidad y en la selección del tipo de cemento más adecuado a las condiciones del proyecto. (Avitia,R.,1972)

La permeabilidad del suelo-cemento se ve reducida de gran forma con la adición de cemento al suelo. Estudios revelan que esta propiedad se ve reducida a razón de 40 veces para un suelo calizo limoso por ejemplo. (Avitia,R.,1972)

Metodología

En este capítulo se expone la metodología propuesta con el fin de alcanzar los objetivos planteados con el proyecto.

Se describen de manera breve los procedimientos realizados de forma ordenada, según la secuencia cronológica de su ejecución.

Todos los cuadros, tablas y figuras que se presentan en este documento fueron generados por el desarrollador del proyecto. De lo contrario, se indicara de manera clara la fuente de la cual provengan.

Granulometría:

Teniendo el suelo, se procedió según las normas ASTM en lo que corresponde al muestreo, identificación y clasificación del suelo. Las normas utilizadas en esta parte son: la ASTM C 136-05 que tiene que ver con el análisis por tamizado de las partes fina y gruesa de agregados, la ASTM C117-04 que tiene que ver con el tamizado de las partículas de suelo más finas que la malla #200 por el método de lavado y la ASTM C 702-98, la cual corresponde al cuarteo del suelo con el fin de reducir la muestra y obtener una porción representativa de esta para efectuar las pruebas.

Se realizó el muestreo del suelo y se extrajeron aprox. 600 kg de suelo para las pruebas. Mediante el método de cuarteo, cuyo procedimiento consiste en tomar el suelo y extenderlo en forma circular en una lona, asegurándose que el suelo quede extendido en una capa del mismo espesor en general, aquí se mezcla bien y se divide el suelo en cuatro partes iguales, de éstas se toman dos que queden opuestas por el vértice resultante de la división y se “desecha” la restante mitad del suelo. Posteriormente, se toman los dos cuartos seleccionados del suelo y se mezclan bien y se vuelve a extender el suelo en una capa de área circular de un mismo espesor, se divide en cuatro

porciones iguales y se repite el procedimiento según se mencionó antes, hasta reducir el espécimen de suelo al tamaño necesario para realizar las pruebas. De una muestra representativa de 125 kg aproximadamente del material, se definió por medio de la malla #4 (4.75 mm) que el suelo estaba compuesto por un 52% de agregado fino y un 48% de agregado grueso. Se utilizaron 30 kg del material para hacer el análisis granulométrico respectivo.

De este total, se tomaron 15.25 kg para hacer la granulometría a las partículas gruesas (partículas retenidas en la malla #4 y 14.25 kg de suelo fino para hacer lo mismo con este.

En la granulometría realizada al material retenido en la malla #4 se empleó la siguiente gama de tamices: tamiz 3”(75mm), tamiz 2”(50 mm), tamiz 1 1/2”(38.1 mm), tamiz 1”(25mm), tamiz 3/4”(19.0 mm), tamiz 3/8”(9.5 mm) y tamiz #4 (4.75mm).

Para efectuar la granulometría de finos, se utilizó un tamaño representativo de muestra de suelo de aproximadamente 450 gr.

Para esta cantidad de suelo, es necesario reducir la muestra del suelo de manera que se obtenga una porción representativa. Después se establece una proporción entre la masa definida originalmente (14.25 kg) y la masa de la muestra representativa (450 gr) para obtener el peso retenido final en cada tamiz.

Esto es necesario realizarlo para facilitar el proceso de tamizar el suelo, debido a que las aberturas de los tamices son muy pequeñas, lo que significaría en tener que realizar una ardua labor con el fin de tamizar esa cantidad de suelo a través de estos tamices.

Los tamices empleados fueron el tamiz #10(2mm), tamiz #40(420 micras), tamiz #100(149 micras), tamiz #200(75 micras) y la charola.

El tamizado del suelo, tanto para el agregado grueso como para el fino, consiste en disponer los tamices de mayor a menor tamaño de abertura, por donde se pasa la muestra

respectiva de suelo previamente lavado y secado (agregado grueso), mediante agitación del grupo de tamices, registrando posteriormente el peso de la fracción de suelo retenido en cada tamiz, teniendo como porcentaje de pérdida permisible de suelo menor al 1% entre la suma de todo el material de cada tamiz y el tamaño original de la muestra. También se aprovecha para tomar una porción de suelo con el fin de calcular la humedad natural de éste según la norma ASTM D-2216.

El resultado del material retenido en la charola más la porción del material perdido durante el lavado del suelo se reporta como la fracción del suelo que pasa la malla #200.

Posteriormente se analiza la porción del suelo que pasa la malla #200 mediante una prueba de precipitación, donde se mide la velocidad de precipitación de las partículas finas del suelo en un determinado tiempo que se encuentran suspendidas en el picnómetro con agua (Ver figura 1).



Figura 1: Prueba de precipitación de partículas de suelo suspendidas en agua.

Límites de Atterberg:

Para realizar esta prueba se utilizó una muestra de suelo de aproximadamente 430 gr.

Este método de prueba se realizó conforme con la Norma ASTM D4318-00, donde se determina tanto el límite líquido como el plástico para una fracción de suelo que pase por el tamiz de la malla #40 (420 micras).

Para el límite líquido se utiliza la copa de Casagrande, donde se le varía la humedad al suelo paulatinamente, se coloca en la copa y se acomoda en esta hasta el nivel del borde exterior de la copa. Posteriormente se le hace una ranura

a la porción del suelo en la copa con un ranurador y mediante golpes ocasionados por el mecanismo de Casagrande, se busca cerrar la ranura tomando en cuenta la cantidad de golpes necesarios para conseguir esta tarea, con estos datos se procede a determinar el límite líquido mediante la construcción de una gráfica, donde se determina la cantidad de humedad necesaria para cerrar la ranura del suelo con una cantidad de 25 golpes.

El límite plástico se establece mediante la formación de bastoncillos de suelo plástico de 3.2 mm (1/8 in) de diámetro hasta que su contenido de humedad se reduzca a tal punto que los bastoncillos se quiebren y no puedan seguir siendo moldeados. El contenido de agua del suelo en ese punto se reporta como el límite plástico. El índice de plasticidad de un suelo se obtiene como la diferencia que existe entre el límite líquido y el plástico.

Con los datos obtenidos de la granulometría y de los límites de Atterberg, se procede a realizar la clasificación del suelo según la Norma ASTM D-3282 que se encuentra en la sección de anexos. Para realizar la clasificación, se necesita el porcentaje de suelo que pasa por los tamices #10, #40 y #200 así como determinar el límite líquido, el índice de plasticidad (IP) y el de grupo.

Elección de los porcentajes de cemento para las pruebas.

Para definir los porcentajes de cemento con los que se van a realizar las diferentes pruebas, es necesario clasificar el suelo según el método de la AASHTO.

Una vez que se clasifica el suelo, se procede a decidir cuál es el porcentaje idóneo mínimo de cemento para dicho suelo y con ello, los porcentajes de cemento que se van a utilizar para estudiar el comportamiento del suelo.

A continuación se presenta un cuadro que muestra los contenidos de cemento requeridos según la AASHTO (*American Association of State Highway Officials*) de los E.U.A para los diferentes grupos de suelo. Este

cuadro se puede apreciar más claramente en la sección de Apéndices de este trabajo.

Grupo AASHO	Intervalos de cemento requerido		Cont. de cemento apropiado por peso	
	% por volumen	% por peso	Ensayo Proctor	Ensayo Durabilidad
A-1-a	5-7	3-5	5	3-5-7
A-1-b	7-9	5-8	6	4-6-8
A-2	7-10	5-9	7	5-7-9
A-3	8-12	7-11	9	7-9-11
A-4	8-12	7-12	10	8-10-12
A-5	8-12	8-13	10	8-10-12
A-6	10-14	9-15	12	10-12-14
A-7	10-14	10-16	13	11-13-15

Elaborado con el programa Microsoft Excel.
Fuente: AASHO

Con la información contenida en este cuadro, se definieron los porcentajes de cemento de interés, de acuerdo con el tipo de suelo utilizado para realizar los ensayos. Estos porcentajes fueron 4%, 6%, 8%, 10% y 12% respectivamente.

Absorción de agregados.

Esta prueba se llevó a cabo siguiendo las disposiciones de la Norma ASTM C127-04 para los áridos gruesos y la Norma ASTM C128-04 para los áridos finos.

Para áridos gruesos por medio de este método se puede determinar la densidad promedio y relativa de las partículas así como la absorción. Se toma una muestra del agregado y se puede poner a secar durante 24 horas a peso constante (optativo, ver Norma), luego se coloca la muestra con agua y se deja reposar por espacio de 24h con el fin de saturar la muestra. Luego se coloca en un paño y se procede a secar el agua superficial del agregado. Cuando se le ha matado el "brillo" al agregado producto del agua superficial, se procede inmediatamente a pesar el material en estado saturado superficie seca. Después se coloca la muestra dentro de una malla y se determina el peso aparentemente sumergido. Al final, se pone la muestra en un horno a 110°C hasta obtener masa constante y

se obtiene el peso de la muestra a temperatura ambiente.

Para los áridos finos, se debe preparar la muestra de suelo previamente, ya que se necesita utilizar el agregado en condición saturado superficie seca.

Para obtener esa condición se pone una muestra de 600 gr de suelo fino y se seca en un horno hasta obtener peso constante. Se deja enfriar el suelo hasta temperatura ambiente y se toma el peso seco. Luego se deja saturar el suelo por 24 h, después se drena el agua con suficiente cuidado de no perder suelo en la acción. Después se coloca en una bandeja metálica y se seca utilizando una estufa con la cual se le agrega calor con el fin de evaporar el exceso de agua de la muestra de suelo. Cuando el suelo se esté secando hay que estar mezclándolo constantemente. En el momento que el suelo muestre cierta fluidez durante el mezclado, se supone que ha alcanzado la condición de saturado superficie seca.

Luego, es necesario efectuar la prueba para la humedad superficial, que consiste en colocar el suelo en la supuesta condición de saturado superficie seca en un molde semejante a un cono, pero recortado antes de su vértice. Este molde se coloca en una superficie no absorbente de forma tal, que el diámetro mayor quede como base del molde.

Se coloca el suelo en un molde de manera tal que la cantidad de suelo exceda el borde superior y con la ayuda de los dedos, se evita la caída de este. Después se apisona el suelo sobre el cono con 25 golpes distribuidos en el área superior del molde, cada golpe se debe dar desde una altura de 5mm sobre la superficie del árido fino. Una vez compactado el material dentro del molde, se limpia el suelo que se encuentre al pie del molde y se procede a levantar el molde de la superficie no absorbente. Si el árido no se derrama, significa que todavía tiene humedad libre y mantendrá la forma moldeada. De lo contrario, se ha alcanzado la condición saturado superficie seca.

En lo que respecta al ensayo para obtener la densidad relativa de un árido fino, se empleó el método gravimétrico utilizando un picnómetro. Éste consiste en tomar una muestra del árido de aproximadamente 500 gr en condición saturado superficie seca y colocarla en el picnómetro parcialmente lleno con agua y se llena hasta que se alcance el 90% de su

capacidad total entre el agua y la muestra de suelo. Después se asegura de sacar todo el aire a la muestra mediante calentamiento, agitación y girando e invirtiendo el picnómetro con el suficiente cuidado de no perder ni degradar el suelo en la acción. Cuando se ha sacado el aire de la muestra, se procede a enfriar el contenido del picnómetro hasta una temperatura de 23°C (+/- 2°C) y posteriormente se llena todo el picnómetro hasta su nivel de aforo con agua y registre su peso.

Luego se coloca la muestra de suelo en un horno y se seca hasta obtener peso constante y se registra el peso de la muestra así como el peso del picnómetro totalmente lleno de agua.

Ensayo de Proctor para mezclas de suelo-cemento.

Este ensayo se realizó siguiendo de manera general los lineamientos de la Norma ASTM D558-03, sin embargo, se usó el método Proctor modificado en vez de aplicar el método Proctor estándar.

La norma permite evaluar la relación entre la humedad y la densidad para suelos finos y con presencia de áridos gruesos.

El procedimiento seguido para realizar la prueba consiste primero en la dosificación de la mezcla con los diferentes porcentajes de cemento elegidos previamente. Ésta se hace con base en el peso total seco de la mezcla, esto es, que de acuerdo con la granulometría, se definen los porcentajes que se agregarán de suelo retenido en la malla #4 y de suelo que pasa la malla #4. En este caso, estos porcentajes corresponden a 48% y 52% respectivamente. Para cada prueba Proctor, se utilizó un total de 8 kg de suelo, siendo ésta la suma tanto de los áridos finos como de los áridos gruesos. Cada uno de los porcentajes de cemento utilizados para este proyecto se calcularon precisamente tomando como base el peso total de la muestra de suelo, o sea, 8 kg.

La cantidad de agua para cada punto de humedad se calculo con base en lo que se menciona en la Norma, de tal manera que para cada punto de humedad evaluado, se aumentó la

cantidad de agua a razón de un 2% adicional con respecto del punto anterior.

A esta cantidad de agua se le realizaron los ajustes respectivos que tienen que ver con la absorción de los agregados y la humedad natural del suelo.

Sobre la preparación de la mezcla, lo primero es mezclar bien el suelo fino con el cemento de manera tal que se logre un color uniforme. Después se le agrega el agua especificada para el punto y se mezcla bien de manera que no queden grumos, cuya formación se da principalmente por la concentración de humedad de manera puntual.

Posteriormente se le añade el agregado grueso en condición de saturado superficie seca, que se debe dejar saturando unas 24 horas previamente a efectuar el ensayo y se mezcla bien con la pasta (agregado fino, cemento y agua). La porción de agregado grueso se compone de una selección de material que pasa la malla de 3/4" y material retenido en la malla #4, que representa el total del porcentaje de todo el material retenido en la malla #4 del suelo.

Es importante mencionar que una vez agregada el agua de la mezcla se tiene un espacio de 2 1/2 horas para realizar el mezclado del suelo-cemento y efectuar la compactación.

La Norma da la posibilidad de reciclar el material utilizado para cada punto del Proctor, con la condición de que el material más grueso no sea degradado durante el proceso de compactación, tal y como sucedió con el suelo utilizado.

Para el proceso de compactación, se empleó el molde de Proctor de 4" de diámetro interno, un mazo de 4,54 Kg de peso que cae desde una altura de 457,2mm y un objeto que permita una mejor distribución del material en el molde antes de la compactación.

El material se compacta en cinco capas del mismo espesor preferiblemente, aplicándose una energía de compactación lograda a partir de suministrar 25 golpes a cada capa con el mazo descrito anteriormente.

Después de la compactación de la tercera capa, se toma una muestra de la mezcla de 750 gr aproximadamente y se seca en un horno hasta peso constante a una temperatura de 110°C, con el fin de obtener el dato de la humedad del suelo en el momento de la compactación.

Cuando se ha finalizado con la compactación de las cinco capas de suelo, se

retira el collar del molde de Proctor, así como todo el suelo que excede la altura del molde y se compacta la superficie lograda, a tal punto que no queden espacios vacíos en la superficie. De ser necesario, se puede adicionar material fino con el fin de lograr un mejor acabado en la superficie, posteriormente se registra el peso de la muestra compactada de suelo más el peso del molde con la base y sin el collar.

Luego se recicla el material compactado, desmenuzando cuidadosamente la muestra moldeada y segregando los grumos formados en la mezcla.

Cuando se ha finalizado con este proceso, se mezcla de nuevo el suelo y se agrega agua en una cantidad entre un 1.5% a un 2%, cantidad necesaria para obtener otro punto de humedad. Se recomienda evaluar de 5 a 6 puntos para poder confeccionar la curva de Proctor para el suelo.

Resistencia a la compresión del suelo-cemento.

Para evaluar la resistencia a la compresión del suelo-cemento, se aplicó un método de prueba similar al establecido en la Norma ASTM D1633-00.

Las probetas de ensayo se prepararon en el molde de 4" de diámetro para la prueba Proctor. La resistencia a la compresión confinada se evaluó para los cinco diferentes porcentajes de cemento que son 4, 6, 8, 10 y 12% y a las edades de 7, 14 y 28 días. Para cada porcentaje de cemento se fabricaron tres especímenes para fallar en cada una de las edades convenidas.

El procedimiento por seguir en la preparación de las probetas consiste en alistarlas utilizando el procedimiento descrito para realizar la prueba Proctor, del mismo modo con el Proctor modificado. La diferencia radica en que, a diferencia del procedimiento seguido en el ensayo para averiguar la relación entre la densidad de un suelo-cemento y la humedad, entre cada capa compactada del suelo-cemento, se aplica un escarificado de la superficie para mejorar la adhesión entre las capas.

Después de esto, se desmolda la probeta cuidadosamente y se coloca en la cámara húmeda por el tiempo necesario hasta la fecha programada de la falla. Es necesario proteger a las probetas de suelo-cemento del agua superficial durante el período de curado, por lo que se recomienda colocar las probetas en bolsas plásticas antes de trasladarlas a la cámara húmeda.



Figura 2: Desmoldeo de probeta.

Con el fin de realizar el ensayo para evaluar la resistencia a la compresión confinada, es necesario coronar (capear) las probetas utilizando una mezcla compuesta por dos partes de cemento y una parte de yeso. Estos compuestos de mezclan bien hasta que el producto tenga un color uniforme y se le agrega agua de tal forma que tenga una adecuada trabajabilidad. Es necesario mencionar que la velocidad de fraguado de la mezcla para hacer el coronamiento de los especímenes, disminuye al aumentar la cantidad de agua de la mezcla.

En el coronamiento, es necesario tener una estructura que tenga como base una superficie totalmente plana, libre de cualquier clase de deformaciones y sea no absorbente. Asimismo, la estructura debe tener una configuración que permita asegurar la perpendicularidad de la probeta en su eje longitudinal, con respecto de la base de la estructura y de la probeta.

Se coloca un pedazo de papel periódico saturado previamente con agua, sobre la base de la estructura, así como una cantidad de mezcla para realizar el coronamiento sobre el pedazo de papel y se manipula sobre el área donde se ha de colocar la base circular de la probeta. Se debe

tratar de conseguir que la superficie creada con la mezcla para el coronamiento sea de un mismo espesor, teniendo cuidado en evitar espacios vacíos o sin mezcla en la superficie. De seguido, se coloca la probeta asegurándose que haya perpendicularidad entre el radio de su base y su eje longitudinal. Se presiona la probeta sobre la mezcla para el coronamiento, desbordándose el exceso de la mezcla por los costados hasta que se consiga que el espesor del coronamiento en la base sea de 2mm de espesor y se deja reposar de 2 a 4 horas hasta que la mezcla fragüe. Se debe limpiar el exceso de la mezcla de los bordes. El pedazo de papel ayuda a prevenir que se dañe la superficie coronada en el momento de retirarla de la estructura sobre la cual se coronó.

Después que la probeta se encuentre coronada, se satura en agua por espacio de cuatro horas antes de fallarse. Cuando la probeta está saturada se saca y se falla a compresión inconfiada, aplicándose la carga a razón de 1mm/min. En este caso, la máquina utilizada fue una máquina para fallar a compresión, probetas de concreto y de mortero, de la marca Versa Tester, la cual se muestra en la figura 2. Como valor final de la carga aplicada de falla se registra el máximo valor registrado en la carátula de la máquina, valor al que se le aplica una corrección producto de la incertidumbre de la carátula. A ese valor se le divide por el área estimada de la probeta y el valor se registra como la capacidad de la probeta a compresión.



Figura 3: Máquina Versa Tester.

Ensayo de ciclos de saturación-secado para suelo-cemento:

Este ensayo consiste en preparar las probetas del mismo modo como se prepararon para el ensayo, donde se evaluó la resistencia a la compresión del suelo-cemento y someterlas a 12 ciclos de saturación y secado por un tiempo determinado, donde al finalizar cada ciclo, se procede a realizar un raspado con un cepillo de la superficie de la probeta con el fin de retirar el material suelto producto de los cambios volumétricos sufridos por la probeta durante cada ciclo.

Esta prueba se realizó de acuerdo con los estándares contenidos en la norma ASTM D 559-03. La única diferencia radica en que las probetas se prepararon mediante el método Proctor modificado, donde además se incluye como parte del procedimiento, el escarificado de la superficie de cada capa con el fin de mejorar la adhesión entre las capas compactadas.

Luego del curado de las probetas por espacio de 7 días en el cuarto húmedo, se procede a aplicar la prueba. Cada ciclo consiste en saturar las probetas por espacio de cinco horas y luego de este tiempo, las probetas se secan en un horno a una temperatura de 71°C por un período de 42 horas. Es necesario registrar el peso de la probeta después del período de saturación, después de secarse al horno y después de realizar el cepillado de la probeta.

El cepillado se realiza con un cepillo especial (Ver figura 3) cuyas especificaciones están contenidas en la Norma y consiste en cepillar a la probeta con el cepillo aplicándose una carga sobre este de 13.3 N (3 Lbf). El cepillo se pasa entre 18 a 20 ocasiones sobre toda el área formada por la circunferencia y la altura de la probeta, de tal modo que se cubra cada parte en al menos dos ocasiones. En la base de la probeta, el cepillado se realiza en al menos cuatro ocasiones por cada base, buscando precisamente cepillar cada punto contenido en esta área en al menos dos ocasiones. Posteriormente, se sacude la probeta, se toma la lectura del peso y se coloca a saturar nuevamente la probeta, comenzando así un nuevo ciclo. Al final de los 12 ciclos, la probeta se

seca a peso constante a una temperatura de 110°C y se toma el peso final de la probeta, realizándose una corrección del peso producto del agua de hidratación de la probeta, que es imposible retirarla de la probeta a esa temperatura y depende del tipo de suelo que se emplee.

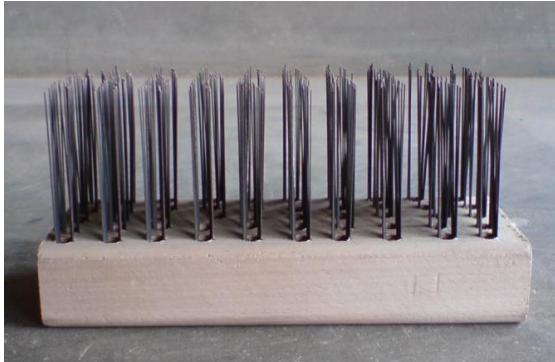


Figura 4: Cepillo Norma ASTM D 559-03

espesor en general y para que pudiera sujetarse en la máquina para abrasión. La cara por fallar fue la cara inferior de la probeta, la cara que da a la base del molde de Proctor.

Las siguientes fotografías ilustran el equipo utilizado así como la forma geométrica lograda con las probetas.



Figura 5: Máquina de Abrasión Norma ASTM C 944

Ensayos de abrasión:

En cuanto a los ensayos de abrasión realizados al suelo-cemento, se efectuaron dos ensayos diferentes según los estándares de la Norma ASTM C 944-99 y la Norma INTE 06-02-15-07.

El ensayo descrito por la Norma ASTM C 944-99 se utiliza para ensayar superficies de mortero y de concreto utilizando un rodillo cortador y fue realizada en las instalaciones del Laboratorio de Concreto y Agregados del Laboratorio Nacional de Materiales y Mediciones (LANAMME).

Las probetas para este ensayo se prepararon del mismo modo como fueron preparadas para las pruebas de resistencia a la compresión y resistencia al intemperismo (ciclos saturación-secado).

Los especímenes se fabricaron con cuatro porcentajes distintos de cemento que son 6, 8, 10 y 12% y para fallar tanto a los 7 como a los 28 días para cada uno de los métodos utilizados. Como se puede apreciar, se descartó preparar las probetas con un 4% de cemento, debido a que no dieron los resultados esperados durante la prueba de intemperismo, por ello se procedió a descartar este porcentaje de cemento para realizar las probetas para abrasión.

Los cilindros de suelo-cemento fabricados para fallar según esta normativa fueron aserrados de manera tal que la probeta tuviera 5cm de

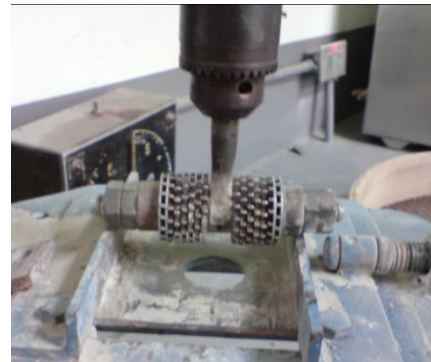


Figura 6: Rodillo Cortador Norma ASTM C 944



Figura 7: Probetas para abrasión de suelo-cemento.

El ensayo consiste en someter a las probetas de suelo-cemento a tres ciclos de

abrasión, cada uno con una duración de dos minutos aproximadamente y se registra la pérdida de peso como porcentaje producto del ensayo.

La probeta se seca al horno a peso constante después de ser aserradas y previamente a realizar el ensayo. Se registra el peso seco de la probeta antes de la prueba y se indica el peso de la probeta después que se ha realizado cada ciclo.

La pérdida de peso del material se expresa como un porcentaje.

Durante la prueba, se aplica una carga directamente sobre el eje que contiene el rodillo cortador de 98 N aproximadamente y la velocidad de giro del taladro es de 200 rev/min aproximadamente.

Ahora bien, para la prueba realizada con la máquina colombiana para la abrasión en adoquines según la Norma INTE 06-02-15-07, las probetas se prepararon igual que para el caso anterior, cambia que las probetas fueron aserradas por la mitad, con el fin de someter al efecto de la abrasión la superficie paralela al plano sobre el cual se realizó el corte. Esto se ilustra en la figura 8. La probeta se coloca en un horno después de ser aserrada, con el fin de secar la superficie sobre la cual se va a efectuar la prueba por espacio de 4 horas a una temperatura de 110°C.

La prueba consiste en someter la probeta a un total de 75 revoluciones de la máquina, donde se produce la abrasión mediante el flujo de arena y un disco metálico. La probeta es fijada en la máquina a través de una especie de carro, este se desliza en dirección hacia el disco, producto de una carga específica colocada suspendida de un cable. Esta carga permite mantener a la probeta fija de manera paralela al plano que contiene el punto de tangencia al disco metálico.

En la figura 9 se ilustra el funcionamiento del mecanismo.



Figura 8: Aserrado de la probeta de abrasión para la máquina colombiana para abrasión de adoquines.



Figura 9: Falla de probeta de abrasión. Máquina colombiana para abrasión de adoquines.

Con esta prueba se genera una huella producto de la abrasión con la arena y el disco. Para determinar la calidad y longitud de la huella, se debe delimitar la huella, utilizando una lupa, una regla y un lápiz de minas de 0.5 mm de espesor. Luego de esto, se determina el ancho de la huella trazada con el fin de determinar con exactitud el punto medio de ésta. Cuando se tiene este punto, se trata una línea que pase por éste con el uso del lápiz y la regla. A esta línea se le denomina línea AB. En cada extremo de la huella, se traza una línea ubicada a 10mm del extremo, denominadas línea CD y línea EF. Luego se compara la longitud de cada una de estas líneas con la línea AB utilizando un vernier. Si la diferencia obtenida entre la línea AB y cada una de las líneas CD es mayor a 1mm, la huella es rechazada. Si ésta se acepta, se calcula la longitud de huella I_h por medio del siguiente algoritmo:

$$I_h \approx AB + (20 - V_c)$$

En donde:

I_h : Longitud de huella (mm).

AB: Longitud aceptada de la línea AB.
 V_c: Valor de calibración (19.6 mm).

El valor de la huella I_h debe estar entre el rango de 20-23 mm (+/- 1mm), de lo contrario, se rechaza.

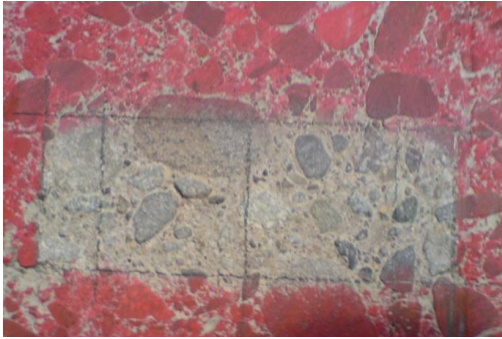


Figura 10: Medición de la huella de abrasión.

En el siguiente cuadro se muestra en resumen la cantidad de probetas preparadas para cada uno de los ensayos realizados.

Cuadro 2: Probetas preparadas durante la investigación.			
Ensayo	Cant. % de cemento	Porcentajes Evaluados	Probetas/Ensayo
Prueba Proctor	5	5	25
Prueba Resist. en Compresión Inconf.	9	5	45
Prueba Ciclos Saturación-Secado	3	5	15
Prueba de Resist. a la Abrasión	20	4	80
Total de Probetas Preparadas			165

Elaborado con el Programa Microsoft Excel.

$$M_e \approx \frac{\left(x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1} \right)}{2} \text{ para cuando n es par.}$$

Desviación Estándar:

$$S \approx \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{(n-1)} \right)}$$

Varianza de la muestra:

$$S^2 \approx \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - X)^2}{(n-1)}$$

Algoritmos estadísticos empleados:

Promedio:

$$X \approx \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

Mediana:

$$M_e \approx x_{\left(\frac{n+1}{2} \right)} \text{ para cuando n es impar.}$$

Resultados:

Todos los cuadros, las tablas y las figuras que se presentan en esta sección, fueron generados por el desarrollador del proyecto. De lo contrario, se indicara la fuente de la que estos provengan.

Identificación y clasificación del suelo:

El suelo utilizado es conocido en el ambiente con el nombre de aluvión, un material de río con presencia de gravas, arenas y material fino. Es de color café claro y no se percibe la presencia de materia orgánica de manera significativa. No hay presencia de partículas con un tamaño mayor a las 3".

En cuanto a la condición de plasticidad del suelo, fue imposible determinar el límite líquido del suelo mediante el método de la copa de Casagrande. Tampoco amasar el suelo y

lograr formar bastones de 3mm de diámetro, por ello se determinó que el suelo es no plástico (NP).

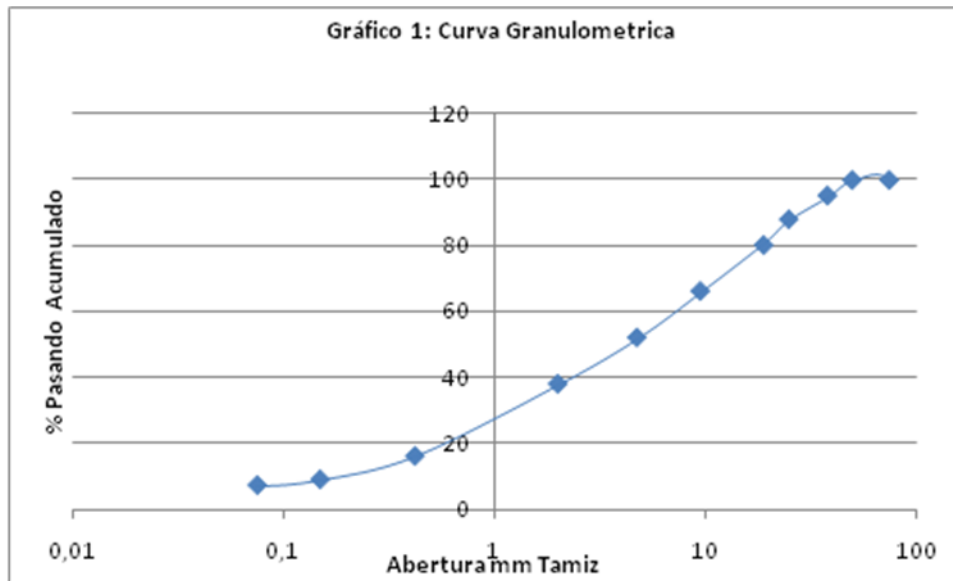
El material que pasa la malla #200 es predominantemente limo, ya que en la prueba de sedimentación, las partículas suspendidas en el agua se precipitaron en cuestión de 5 minutos (Ver figura 1).

Con base en esta información y a la información obtenida de la granulometría, se clasifica el suelo según la Norma ASTM D-3282 como un suelo A-1-a, con un 38% del material pasando la malla #10, cerca de un 16% del material pasando la malla #40, menos de un 8% del material pasando la malla #200 y con una humedad natural de 3% aproximadamente.

Estos resultados se representan mejor en la tabla 1 y con la curva granulométrica del material que se muestran a continuación:

Item	Ws Ret (Kg)	% Ret.	% Ret. Acum.	% Pas. Acum.
Malla 3"	0	0	0	100
Malla 2"	0	0	0	100
Malla 1-1/2"	1,367	4,695	4,695	95,305
Malla 1"	2,090	7,179	11,874	88,126
Malla 3/4"	2,264	7,776	19,650	80,350
Malla 3/8"	4,057	13,935	33,585	66,415
Malla #4	4,094	14,062	47,647	52,353
Malla 10	4,087	14,037	61,684	38,316
Malla 40	6,353	21,821	83,505	16,495
Malla 100	2,065	7,092	90,597	9,403
Malla 200	0,511	1,754	92,352	7,648
Charola	2,227	7,648	100	0

Elaborado con el programa Microsoft Excel.



Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Absorción de los agregados:

Es necesario tomar en cuenta la absorción de los áridos finos y gruesos en el diseño de las mezclas de suelo-cemento, debido a la gran importancia que tiene la cantidad de agua presente en el suelo para que se desarrolle no sólo el proceso de hidratación del cemento, sino también, para lograr un buen grado de densificación del material.

En las tablas 2 y 3 que se muestran a continuación, se presentan los resultados obtenidos para el porcentaje de absorción para el agregado grueso y para el agregado fino respectivamente.

La absorción para el agregado grueso se obtiene según el siguiente algoritmo:

$$\% Abs \approx \frac{(A - B)}{B} * 100$$

En donde:

A: Peso del agregado en condición saturado superficie seca.

B: Peso del agregado seco.

La absorción del agregado fino se obtiene según el siguiente algoritmo:

$$\% Abs \approx \frac{((A - C) - B)}{B} * 100$$

Donde:

A: Peso del agregado fino en condición saturado superficie seca más la masa del picnómetro.

B: Peso del agregado fino seco.

C: Peso del picnómetro.

Wband. 13 (Kg)	1,305
Ws + b13 (Kg)	6,240
Ws (Kg) (<u>B</u>)	4,935
Wsss + b13 (kg)	6,357
Wsss (kg) (<u>A</u>)	5,052
W canast sum (Kg)	1,847
W can + mat sum (Kg)	4,990
W mat sum (Kg)	3,143
Temp. Agua (°C)	23,0
% Abs	2,371

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Wband. 40 (g)	432,52
Ws + b40 (g)	912,90
Ws (g) (<u>B</u>)	480,38
W pic 15 (g) (<u>C</u>)	173,21
W arena sss + pic (g) (<u>A</u>)	688,26
W arena sss (g)	515,05
W pic + H ₂ O (g)	670,69
W pic + Arena + H ₂ O (g)	970,80
% Abs	7,217

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Prueba Proctor para suelo-cemento.

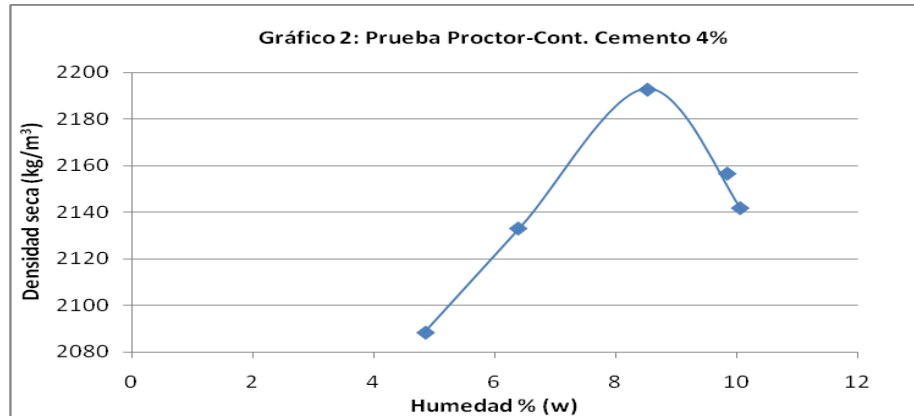
En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la prueba Proctor para el suelo estabilizado con cinco porcentajes de cemento distintos. La prueba Proctor permite ver el comportamiento de un suelo durante el proceso de compactación, determinando la humedad a la

cual el suelo puede alcanzar el máximo grado de densidad.

A continuación, se presenta una serie de tablas y gráficos con los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas en el laboratorio para cada mezcla de suelo-cemento.

Tabla 4: Prueba Proctor-Contenido de Cemento 4%.							
Item	W H ₂ O (g)	W sc + molde 22 (g)	Wsc (g)	Γ_m (g/cm ³)	Γ_m (Kg/m ³)	Γ_d (Kg/m ³)	w %
Pto 1	166	6302	2065	2,190	2189,94	2088,32	4,87
Pto 2	154	6377	2140	2,269	2269,47	2132,99	6,40
Pto 3	154	6481	2244	2,380	2379,77	2192,54	8,54
Pto 4	154	6471	2234	2,369	2369,16	2156,53	9,86
Pto 5	120	6460	2223	2,357	2357,50	2141,74	10,07

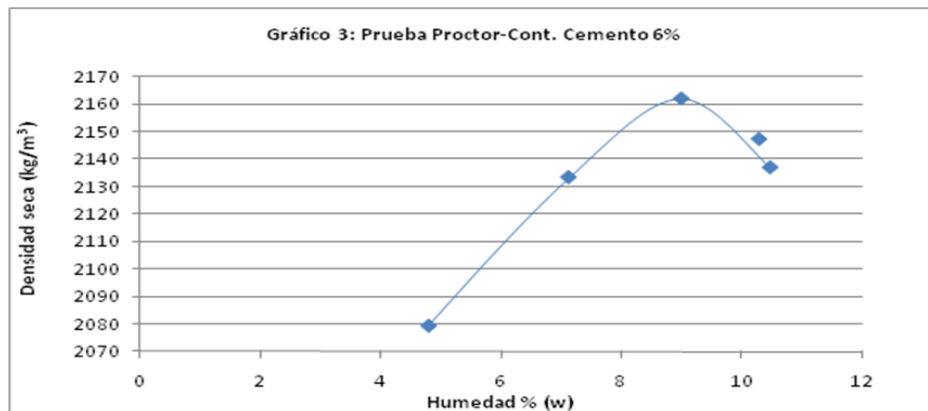
Elaborado con el programa Microsoft Excel.



Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 5: Prueba Proctor-Contenido de Cemento 6%.							
Item	W H ₂ O (g)	W sc + molde 22 (g)	Wsc (g)	Γ_m (g/cm ³)	Γ_m (Kg/m ³)	Γ_d (Kg/m ³)	w %
Pto 1	170	6292	2055	2,179	2179,33	2079,24	4,81
Pto 2	157	6392	2155	2,285	2285,38	2133,29	7,13
Pto 3	144	6459	2222	2,356	2356,43	2161,86	9,00
Pto 4	131	6470	2233	2,368	2368,10	2147,16	10,29
Pto 5	118	6463	2226	2,361	2360,68	2136,85	10,47

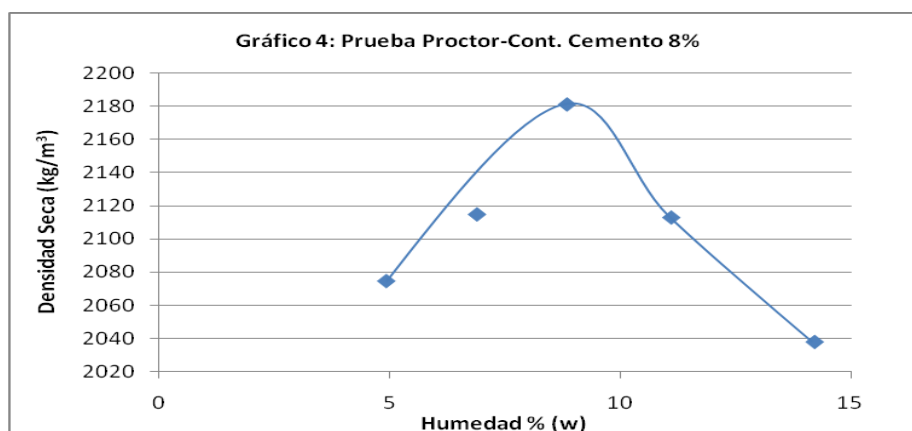
Elaborado con el programa Microsoft Excel.



Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 6: Prueba Proctor-Contenido de Cemento 8%.							
Item	W H ₂ O (g)	W sc + molde 22 (g)	Wsc (g)	Γ_m (g/cm ³)	Γ_m (Kg/m ³)	Γ_d (Kg/m ³)	w %
Pto 1	173	6290	2053	2,177	2177,21	2074,67	4,94
Pto 2	160	6369	2132	2,261	2260,99	2114,92	6,91
Pto 3	149	6476	2239	2,374	2374,46	2181,27	8,86
Pto 4	137	6451	2214	2,348	2347,95	2113,04	11,12
Pto 5	101	6432	2195	2,328	2327,80	2037,91	14,22

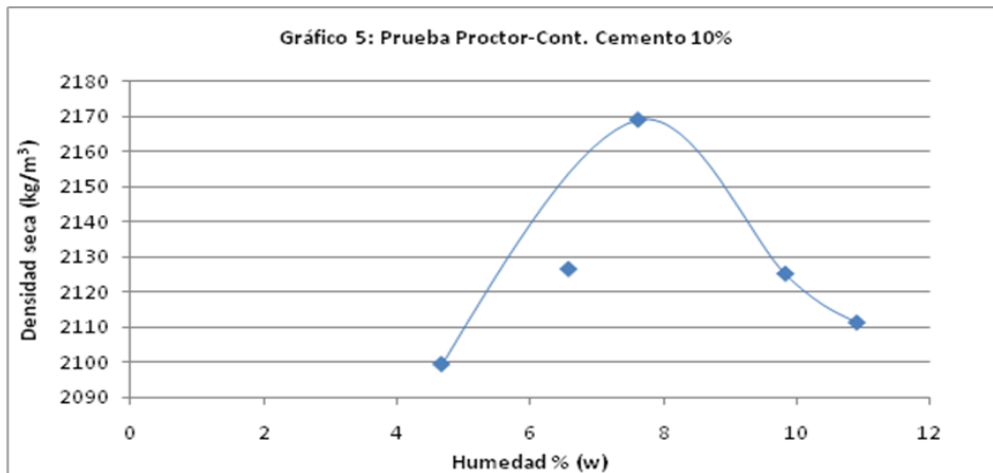
Elaborado con el programa Microsoft Excel.



Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 7: Prueba Proctor-Contenido de Cemento 10%.							
Item	W H ₂ O (g)	W sc + molde 22 (g)	Wsc (g)	Γ_m (g/cm ³)	Γ_m (Kg/m ³)	Γ_d (Kg/m ³)	w %
Pto 1	176	6309	2072	2,197	2197,36	2099,63	4,65
Pto 2	163	6374	2137	2,266	2266,29	2126,66	6,57
Pto 3	150	6438	2201	2,334	2334,16	2169,10	7,61
Pto 4	137	6438	2201	2,334	2334,16	2125,33	9,83
Pto 5	124	6445	2208	2,342	2341,59	2111,45	10,90

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

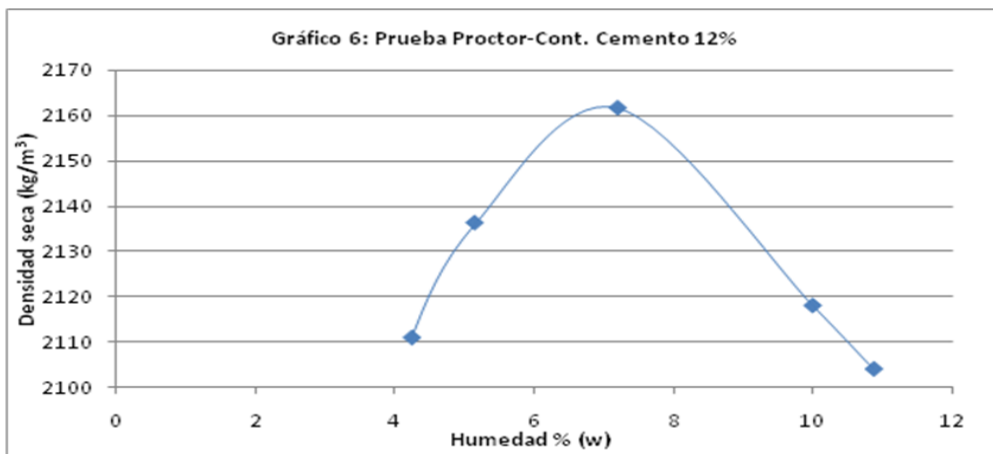


Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 8: Prueba Proctor-Contenido de Cemento 12%.

Item	W H ₂ O (g)	W sc + molde 22 (g)	Wsc (g)	Γ_m (g/cm ³)	Γ_m (Kg/m ³)	Γ_d (Kg/m ³)	w %
Pto 1	170	6312	2075	2,201	2200,54	2111,07	4,24
Pto 2	160	6355	2118	2,246	2246,14	2136,36	5,14
Pto 3	150	6422	2185	2,317	2317,20	2161,63	7,20
Pto 4	140	6434	2197	2,330	2329,92	2118,13	10,00
Pto 5	130	6437	2200	2,333	2333,10	2104,17	10,88

Elaborado con el programa Microsoft Excel.



Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Resistencia en compresión del material:

La propiedad de la resistencia en compresión fue analizada para cinco mezclas de suelo-cemento, correspondientes a las distintas dosificaciones de cemento por % del peso de la mezcla del suelo-cemento seca. Estos porcentajes son 4, 6, 8, 10 y 12%.

Para cada una de estas mezclas, se fabricaron probetas con la intención de evaluar la evolución de la resistencia en el tiempo. Se fabricaron tres probetas por cada fecha de falla, para fallar a 7, 14 y 28 días respectivamente.

También se evaluó la variación de la resistencia con respecto de los distintos porcentajes de cemento.

Se realiza una breve comparación de los resultados obtenidos con respecto de los Manuales de Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos, Carreteras y Puentes de Costa Rica (CR-77) y con el CR-2002, en cuanto a algunos requisitos mínimos de resistencia en compresión que se piden para materiales similares.

A continuación se presenta una serie de tablas y gráficas por medio de las cuales se representan los datos obtenidos en estas pruebas, así como algunas relaciones destacadas en esta investigación entre dichos datos. También se muestra para cada tabla de resultados, una con algunos datos estadísticos de interés para el análisis de los resultados obtenidos.

Item	W aplic (kg)	Fact. Corr.	W total (g)	Area (cm ²)	Fc (kg/cm ²)
P1	2650	1,0549	2795,49	81,073	34,48
P2	2310	1,0549	2436,82	81,073	30,06
P3	2375	1,0549	2505,39	81,073	30,90

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Promedio	31,81
Mediana	30,90
Desviación	2,35
Varianza	5,52

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Item	W aplic (kg)	Fact. Corr.	W total (kg)	Area (cm ²)	Fc (kg/cm ²)
P1	3450	1,0667	3680,12	81,073	45,39
P2	3550	1,0667	3786,79	81,073	46,71
P3	3000	1,0549	3164,70	81,073	39,04

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 12: Estadística-Resultados Resist. Comp. Tabla 11.	
Promedio	43,71
Mediana	45,39
Desviación	4,10
Varianza	16,84

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 13: Resistencia en Compresión. Edad 7 días. 8% Cemento.					
Item	W aplic (kg)	Fact. Corr.	W total (kg)	Area (cm ²)	Fc (kg/cm ²)
P1	3750	1,0667	4000,13	81,073	49,340
P2	3650	1,0667	3893,46	81,073	48,024
P3	3625	1,0667	3866,79	81,073	47,695

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 14: Estadística-Resultados Resist. Comp. Tabla 13.	
Promedio	48,35
Mediana	48,02
Desviación	0,87
Varianza	0,76

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 15: Resistencia en Compresión. Edad 7 días. 10% Cemento.					
Item	W aplic (kg)	Fact. Corr.	W total (kg)	Area (cm ²)	Fc (kg/cm ²)
P1	3775	1,0667	4026,79	81,073	49,67
P2	3500	1,0667	3733,45	81,073	46,05
P3	4025	1,0667	4293,47	81,073	52,96

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 16: Estadística-Resultados Resist. Comp. Tabla 15.	
Promedio	49,56
Mediana	49,67
Desviación	3,46
Varianza	11,94

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 17: Resistencia en Compresión. Edad 7 días.12% Cemento.					
Item	W aplic (kg)	Fact. Corr.	W total (kg)	Area (cm ²)	Fc (kg/cm ²)
P1	4525	1,0667	4826,82	81,073	59,54
P2	5150	1,0667	5493,51	81,073	67,76
P3	4025	1,0667	4293,47	81,073	52,96

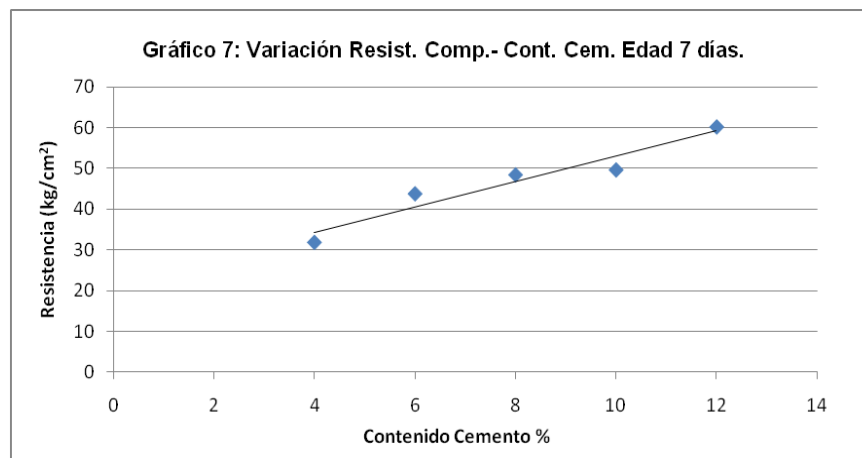
Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 18: Estadística-Resultados Resist. Comp. Tabla 17.	
Promedio	60,08
Mediana	59,54
Desviación	7,42
Varianza	55,00

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 19: Resist. Prom. vrs % Cemento. Edad 7 días.	
Contenido Cemento %	Resistencia Compresión (kg/cm ²)
4	31,814
6	43,712
8	48,353
10	49,559
12	60,085

Elaborado con el programa Microsoft Excel.



Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 20: Resistencia en Compresión. Edad 14 días. 4% Cemento.					
Item	W aplic (kg)	Fact. Corr.	W total (g)	Area (cm ²)	Fc (kg/cm ²)
P1	2455	1,0549	2589,78	81,073	31,94
P2	2510	1,0549	2647,80	81,073	32,66
P3	2760	1,0549	2911,52	81,073	35,91

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 21: Estadística-Resultados Resist. Comp. Tabla 20.	
Promedio	33,51
Mediana	35,91
Desviación	2,12
Varianza	4,47

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 22: Resistencia en Compresión. Edad 14 días. 6% Cemento.					
Item	W aplic (kg)	Fact. Corr.	W total (kg)	Area (cm ²)	Fc (kg/cm ²)
P1	3500	1,0667	3733,45	81,073	46,05
P2	3125	1,0667	3333,44	81,073	41,12
P3	3500	1,0667	3733,45	81,073	46,05

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 23: Estadística-Resultados Resist. Comp. Tabla 22.	
Promedio	44,41
Mediana	46,05
Desviación	2,85
Varianza	8,11

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 24: Resistencia en Compresión. Edad 14 días. 8% Cemento.					
Item	W aplic (kg)	Fact. Corr.	W total (kg)	Area (cm ²)	Fc (kg/cm ²)
P1	4025	1,0667	4293,47	81,073	52,96
P2	4500	1,0667	4800,15	81,073	59,21
P3	4300	1,0667	4586,81	81,073	56,58

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 25: Estadística-Resultados Resist. Comp. Tabla 24.	
Promedio	56,25
Mediana	56,58
Desviación	3,14
Varianza	9,85

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 26: Resistencia en Compresión 14 días 10% Cemento					
Item	W aplic (kg)	Fact. Corr.	W total (kg)	Area (cm ²)	Fc (kg/cm ²)
P1	4950	1,0667	5280,17	81,073	65,13
P2	5025	1,0667	5360,17	81,073	66,12
P3	4775	1,0667	5093,49	81,073	62,83

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 27: Estadística-Resultados Resist. Comp. Tabla 26.	
Promedio	64,69
Mediana	65,13
Desviación	1,69
Varianza	2,85

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 28: Resistencia en Compresión 14 días 12% Cemento					
Item	W aplic (kg)	Fact. Corr.	W total (kg)	Area (cm ²)	Fc (kg/cm ²)
P1	6300	1,0667	6720,21	81,073	82,89
P2	5325	1,0667	5680,18	81,073	70,06
P3	6125	1,0667	6533,54	81,073	80,59

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

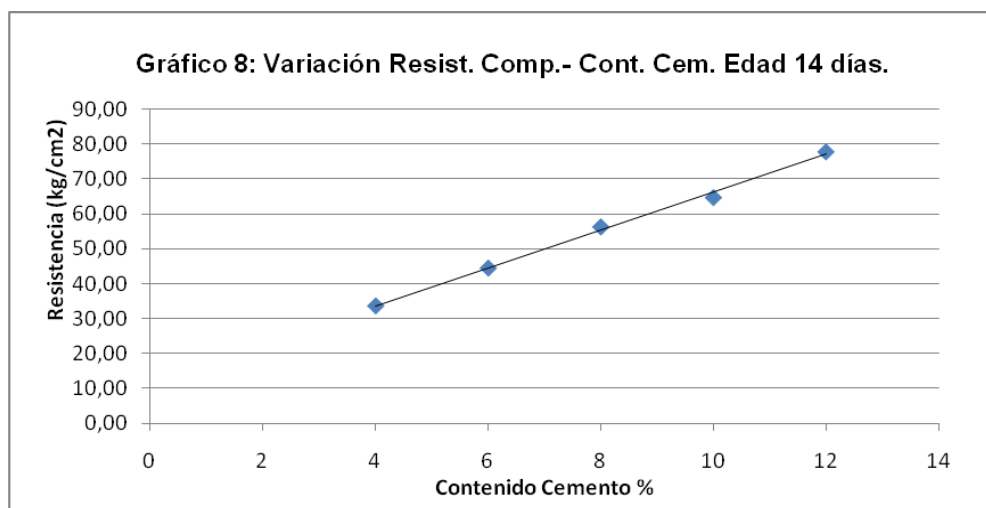
Tabla 29: Estadística-Resultados Resist. Comp. Tabla 28.	
Promedio	77,85
Mediana	80,59
Desviación	6,84
Varianza	46,78

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 30: Resist. Prom. vrs % Cemento. Edad 14 días.

Contenido Cemento %	Resistencia Compresión (kg/cm ²)
4	33,51
6	44,41
8	56,25
10	64,69
12	77,85

Elaborado con el programa Microsoft Excel.



Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 31: Resistencia en Compresión 28 días 4% Cemento

Item	W aplic (kg)	Fact. Corr.	W total (kg)	Area (cm ²)	Fc (kg/cm ²)
P1	3050	1,0667	3253,44	81,073	40,13
P2	3125	1,0667	3333,44	81,073	41,12
P3	3125	1,0667	3333,44	81,073	41,12

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 32: Estadística-Resultados Resist. Comp. Tabla 31.

Promedio	40,79
Mediana	41,12
Desviación	0,57
Varianza	0,32

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 33: Resistencia en Compresión 28 días 6% Cemento					
Item	W aplic (kg)	Fact. Corr.	W total (kg)	Area (cm ²)	Fc (kg/cm ²)
P1	3875	1,0667	4133,46	81,073	50,98
P2	3750	1,0667	4000,13	81,073	49,34
P3	4025	1,0667	4293,47	81,073	52,96

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 34: Estadística-Resultados Resist. Comp. Tabla 33.	
Promedio	51,09
Mediana	50,98
Desviación	1,81
Varianza	3,28

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 35: Resistencia en Compresión 28 días 8% Cemento					
Item	W aplic (kg)	Fact. Corr.	W total (kg)	Area (cm ²)	Fc (kg/cm ²)
P1	5550	1,0667	5920,19	81,073	73,02
P2	6050	1,0667	6453,54	81,073	79,60
P3	5775	1,0667	6160,19	81,073	75,98

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 36: Estadística-Resultados Resist. Comp. Tabla 35.	
Promedio	76,20
Mediana	75,98
Desviación	3,29
Varianza	10,86

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 37: Resistencia en Compresión 28 días 10% Cemento					
Item	W aplic (kg)	Fact. Corr.	W total (kg)	Area (cm ²)	Fc (kg/cm ²)
P1	5775	1,0667	6160,19	81,073	75,98
P2	6475	1,0667	6906,88	81,073	85,19
P3	6154	1,0667	6564,47	81,073	80,97

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 38: Estadística-Resultados Resist. Comp. Tabla 37.	
Promedio	80,72
Mediana	80,97
Desviación	4,61
Varianza	21,25

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 39: Resistencia en Compresión 28 días 12% Cemento					
Item	W aplic (kg)	Fact. Corr.	W total (kg)	Area (cm ²)	Fc (kg/cm ²)
P1	6350	1,0667	6773,55	81,073	83,55
P2	6875	1,0667	7333,56	81,073	90,46
P3	6000	1,0667	6400,20	81,073	78,94

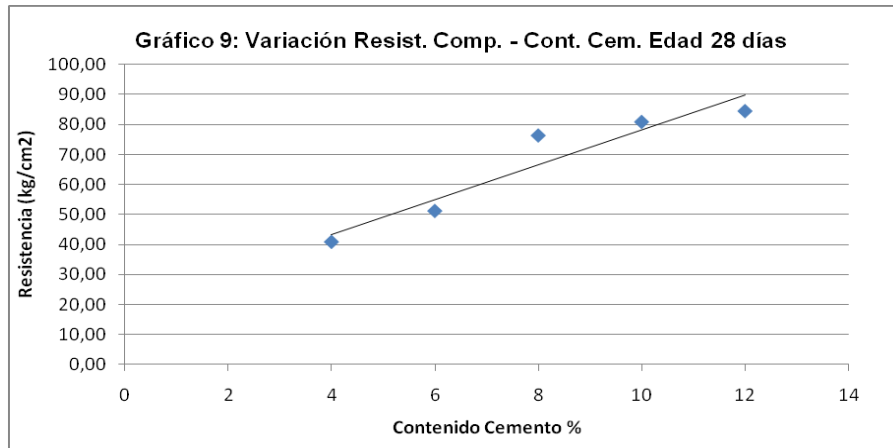
Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 40: Estadística-Resultados Resist. Comp. Tabla 39.	
Promedio	84,32
Mediana	83,55
Desviación	5,79
Varianza	33,58

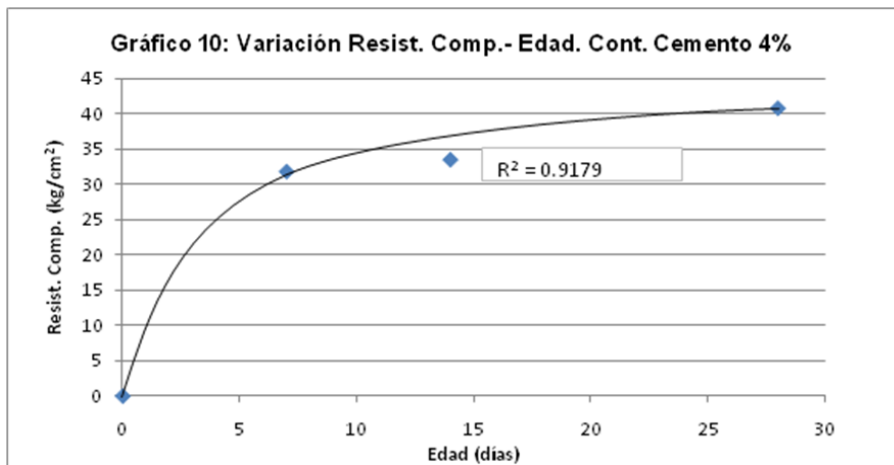
Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 41: Resist. Prom. vrs % Cemento. Edad 28 días.	
Contenido Cemento %	Resistencia Compresión (kg/cm ²)
4	40,79
6	51,09
8	76,20
10	80,72
12	84,32

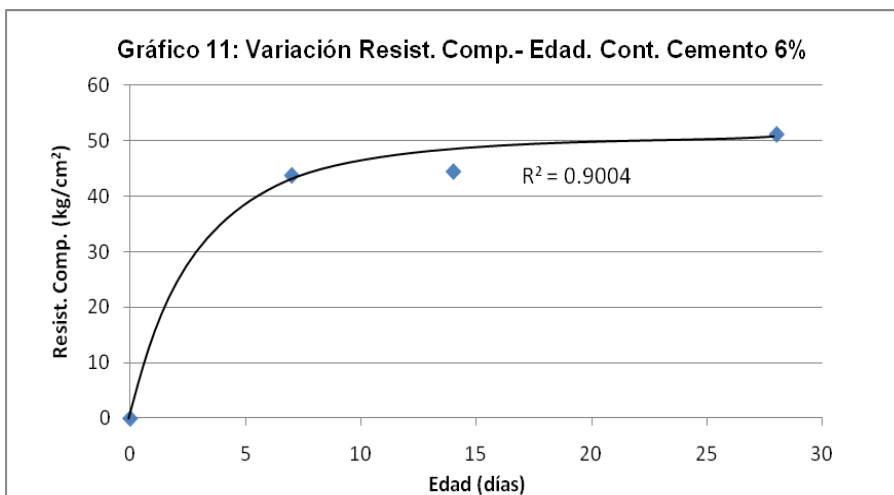
Elaborado con el programa Microsoft Excel.



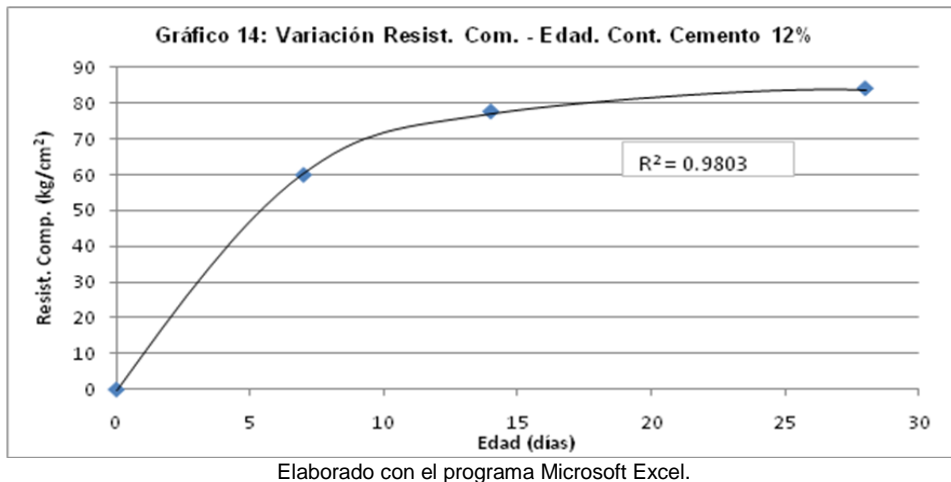
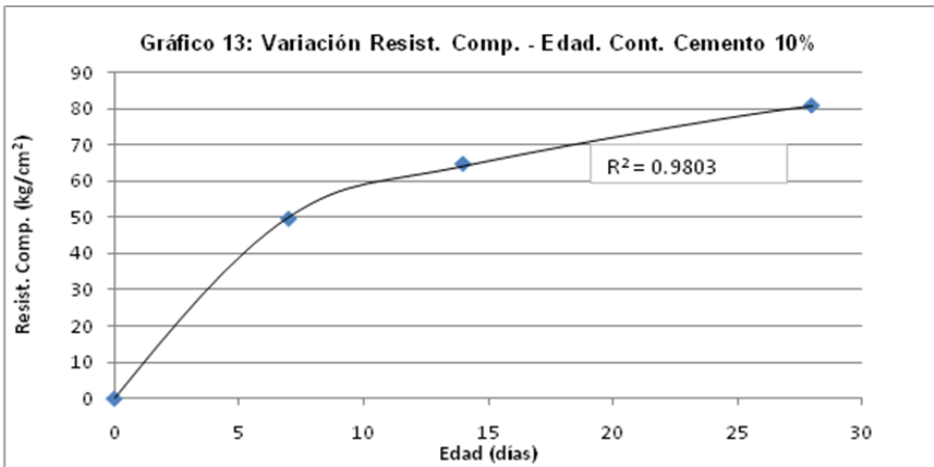
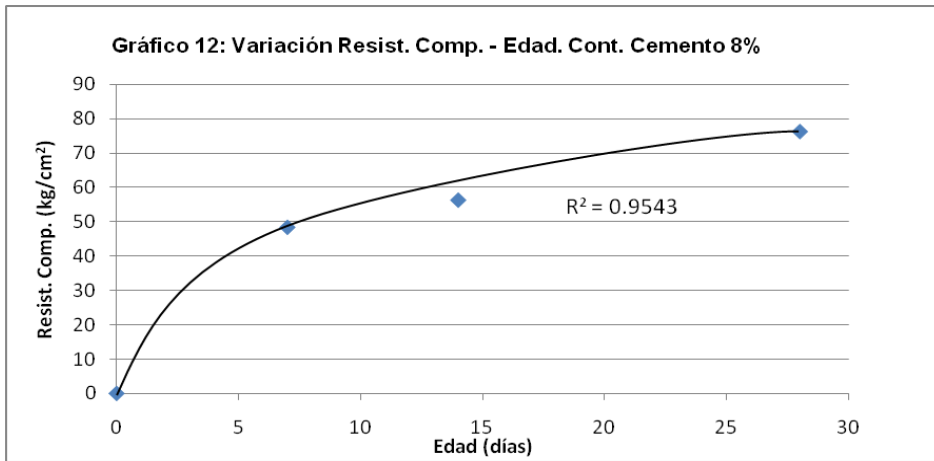
Elaborado con el programa Microsoft Excel.



Elaborado con el programa Microsoft Excel.



Elaborado con el programa Microsoft Excel.



Item	Probetas 4% Cemento	Probetas 6% Cemento	Probetas 8% Cemento	Probetas 10% Cemento	Probetas 12% Cemento
Resistencia Comp. Prom. (kg/cm ²)	31,81	43,71	48,35	49,56	60,08
BE-25 CR-77/ 21-30 (kg/cm ²)	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
BE-35 CR-77/ 30-40 (kg/cm ²)	Cumple con mínimo.	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
BE-25 CR-2002/ 25-30 (kg/cm ²)	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
BE-35 CR-2002/ 30-40 (kg/cm ²)	Cumple con mínimo.	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Resistencia al intemperismo (Ciclos de saturación-secado).

La resistencia al intemperismo se evaluó mediante la prueba de ciclos de saturación-secado para especímenes de una edad de 7 días. No fue posible evaluarse esta resistencia para otras edades debido a las condiciones particulares en las cuales es necesario realizar la prueba. Se evaluaron un total de tres probetas

por cada mezcla de suelo-cemento. Durante la prueba, no fue posible percibir ningún cambio volumétrico en ellas, tanto después del período de saturación en agua como después del período de secado en el horno.

A continuación se presenta una serie de tablas y gráficos donde muestran los datos obtenidos durante esta prueba. Éstos se comparan contra las especificaciones contenidas en la Norma ASTM D 559-96. Además se agrega una tabla adicional con la estadística básica asociada a cada tabla de datos.

Item	Molde	W _{sc} + molde (g)	W _{sc} (g)	Γ_m (g/cm ³)	Γ_m (Kg/m ³)	Γ_d (Kg/m ³)	Ws/12 ciclos (g)	Γ_{df} (Kg/m ³)	Pérdida %
Probeta 1	1	6470	2224	2,359	2358,56	2172,19	1856,5	1939,73	10,70
Probeta 2	10	6476	2236	2,371	2371,28	2165,66	1839,8	1922,28	11,24
Probeta 3	22	6484	2247	2,383	2382,95	2172,64	1805,4	1886,33	13,18

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Promedio	11,71
Mediana	11,24
Desviación	1,30
Varianza	1,70

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 44. Resultados Prueba Ciclos Saturación-Secado. Cont. Cemento 6%									
Item	Molde	W sc + molde (g)	Wsc (g)	Γ_m (g/cm ³)	Γ_m (Kg/m ³)	Γ_d (Kg/m ³)	Ws/12 ciclos (g)	Γ_{df} (Kg/m ³)	Pérdida %
Probeta 1	1	6490	2244	2,380	2379,77	2184,16	1960,8	2048,70	6,20
Probeta 2	10	6488	2248	2,384	2384,01	2177,08	1988,3	2077,43	4,58
Probeta 3	22	6469	2232	2,367	2367,04	2162,07	2020,8	2111,39	2,34

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 45: Estadística-Resultados Resist. Intemp. Tabla 44.	
Promedio	4,37
Mediana	4,58
Desviación	1,94
Varianza	3,75

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 46. Resultados Prueba Ciclos Saturación-Secado. Cont. Cemento 8%									
Item	Molde	W sc + molde (g)	Wsc (g)	Γ_m (g/cm ³)	Γ_m (Kg/m ³)	Γ_d (Kg/m ³)	Ws/12 ciclos (g)	Γ_{df} (Kg/m ³)	Pérdida %
Probeta 1	1	6497	2254	2,390	2390,37	2190,22	2034,9	2126,12	2,93
Probeta 2	10	6495	2257	2,394	2393,55	2189,34	2062,9	2155,38	1,55
Probeta 3	22	6482	2249	2,385	2385,07	2180,79	2057,5	2149,74	1,42

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 47: Estadística-Resultados Resist. Intemp. Tabla 46.	
Promedio	1,97
Mediana	1,55
Desviación	0,83
Varianza	0,69

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 48. Resultados Prueba Ciclos Saturación-Secado. Cont. Cemento 10%									
Item	Molde	W sc + molde (g)	Wsc (g)	Γ_m (g/cm ³)	Γ_m (Kg/m ³)	Γ_d (Kg/m ³)	Ws/12 ciclos (g)	Γ_{df} (Kg/m ³)	Pérdida %
Probeta 1	1	6429	2183	2,315	2315,08	2146,78	1991,6	2080,88	3,07
Probeta 2	10	6423	2183	2,315	2315,08	2135,95	1987,6	2076,70	2,77
Probeta 3	22	6413	2176	2,308	2307,65	2128,29	1998,4	2087,99	1,89

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 49: Estadística-Resultados Resist. Intemp. Tabla 48.	
Promedio	2,58
Mediana	2,77
Desviación	0,61
Varianza	0,37

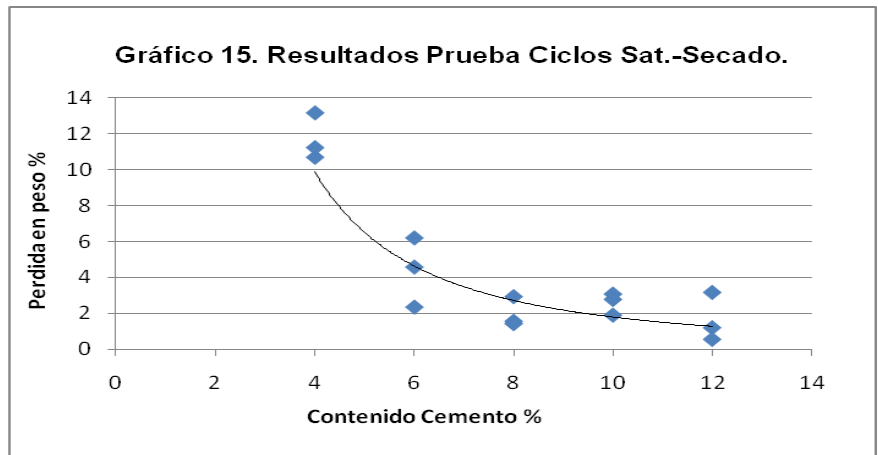
Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 50. Resultados Prueba Ciclos Saturación-Secado. Cont. Cemento 12%									
Item	Molde	W sc + molde (g)	Wsc (g)	Γ_m (g/cm ³)	Γ_m (Kg/m ³)	Γ_d (Kg/m ³)	Ws/12 ciclos (g)	Γ_{df} (Kg/m ³)	Pérdida %
Probeta 1	1	6429	2183	2,315	2315,08	2143,98	1987,1	2076,18	3,16
Probeta 2	10	6423	2183	2,315	2315,08	2134,89	2018,9	2109,41	1,19
Probeta 3	22	6413	2176	2,308	2307,65	2126,95	2024,6	2115,36	0,54

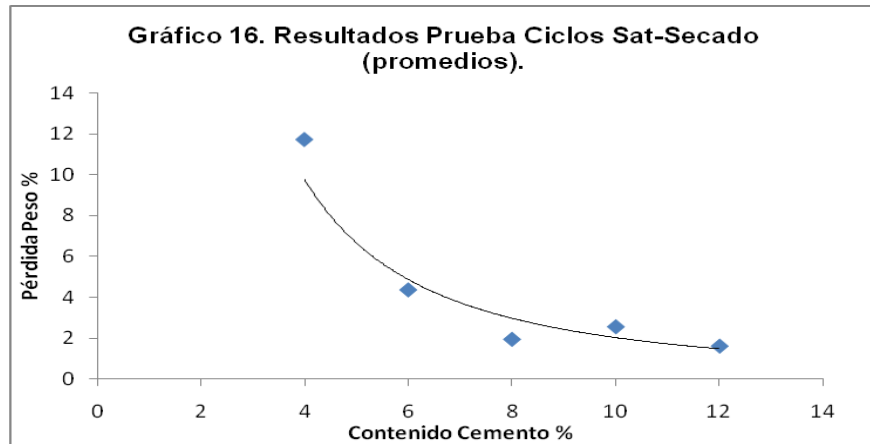
Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 51: Estadística-Resultados Resist. Intemp. Tabla 50.	
Promedio	1,63
Mediana	1,19
Desviación	1,36
Varianza	1,86

Elaborado con el programa Microsoft Excel.



Elaborado con el programa Microsoft Excel.



Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 52. Comparación de los resultados contra la norma ASTM D 559-96.

Item	Perdida prom. Registrada (%)	Pérdida según la Norma ASTM D 559-96	Condición
Probetas 4% cemento	11,71	6-0 para suelo A-1-b	No cumple
Probetas 6% cemento	4,37	6-0 para suelo A-1-b	Cumple
Probetas 8% cemento	1,97	6-0 para suelo A-1-b	Cumple
Probetas 10% cemento	2,58	6-0 para suelo A-1-b	Cumple
Probetas 12% cemento	1,63	6-0 para suelo A-1-b	Cumple

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Resistencia a la abrasión.

La resistencia a la abrasión para este tipo de material ha sido poco estudiada, por eso no fue posible contar con una metodología estándar especialmente diseñada para valorar esta propiedad. Por lo tanto, se propone evaluar esta propiedad utilizando dos pruebas disponibles en el país, el ensayo según la Norma ASTM C 944-99 y el de la Norma INTE 06-02-15-07.

Las pruebas se aplican según cada una de ellas, de lo que cabe destacar son pruebas de abrasión para superficies de mortero y de concreto (ASTM C 944-99) y para adoquines (INTE 06-02-15-07).

A continuación se presentan los datos con ayuda de tablas y gráficos, donde se resaltan algunas relaciones entre los datos de interés. Asimismo, como en los apartados anteriores de este capítulo, se incorporan tablas con información estadística básica necesaria en la interpretación de los datos obtenidos.

Tabla 53. Resultados Abrasión Suelo-Cemento 7 días. Norma INTE 06-02-15-07.						
Item	Long. Desg (mm)	Anc. Huella extr.1 (mm)	Anc. Huella extr.2 (mm)	Acepta/Rechaza	lh (mm)	Condición lh
P1-6%	18,18	18,53	18,63	Acepta	18,58	Rechaza
P2-6%	19,69	19,09	19,47	Acepta	20,09	Acepta
P3-6%	19,18	19,89	19,25	Acepta	19,58	Acepta
P4-6%	20,19	20,16	20,45	Acepta	20,59	Acepta
P5-6%	17,95	17,46	17,84	Acepta	18,35	Rechaza
P6-6%	18,32	18,41	18,77	Acepta	18,72	Rechaza
P7-6%	22,82	22,89	22,69	Acepta	23,22	Acepta

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 54: Estadística-Resultados Resist. Abrasión. Tabla 53.	
Promedio	19,88
Mediana	19,58
Desviación	0,69
Varianza	2,86

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 55. Resultados Abrasión Suelo-Cemento 7 días. Norma INTE 06-02-15-07.						
Item	Long. Desg (mm)	Anc. Huella extr.1 (mm)	Anc. Huella extr.2 (mm)	Acepta/Rechaza	lh (mm)	Condición lh
P1-8%	21,82	21,8	21,77	Acepta	22,22	Acepta
P2-8%	23,9	24,32	23,52	Acepta	24,3	Rechaza
P3-8%	20,94	20,87	20,71	Acepta	21,34	Acepta
P4-8%	22,66	22,47	23,33	Acepta	23,06	Acepta
P5-8%	21,71	22,26	21,59	Acepta	22,11	Acepta
P6-8%	21,83	21,88	21,94	Acepta	22,23	Acepta
P7-8%	24,98	25,14	24,46	Acepta	25,38	Rechaza

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 56: Estadística-Resultados Resist. Abrasión. Tabla 55.	
Promedio	22,95
Mediana	22,23
Desviación	0,58
Varianza	2,01

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 57. Resultados Abrasión Suelo-Cemento 7 días. Norma INTE 06-02-15-07.						
Item	Long. Desg (mm)	Anc. Huella extr.1 (mm)	Anc. Huella extr.2 (mm)	Acepta/Rechaza	lh (mm)	Condición lh
P1-10%	19,53	19,57	19,41	Acepta	19,93	Acepta
P2-10%	22,71	22,57	22,32	Acepta	23,11	Acepta
P3-10%	20,64	20,55	20,75	Acepta	21,04	Acepta
P4-10%	19,97	20,29	20,21	Acepta	20,37	Acepta
P5-10%	19,68	20,46	19,48	Acepta	20,08	Acepta
P6-10%	21,3	21,32	20,68	Acepta	21,7	Acepta
P7-10%	23,29	23,12	23,68	Acepta	23,69	Acepta

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 58: Estadística-Resultados Resist. Abrasión. Tabla 57.	
Promedio	21,42
Mediana	21,04
Desviación	0,61
Varianza	2,22

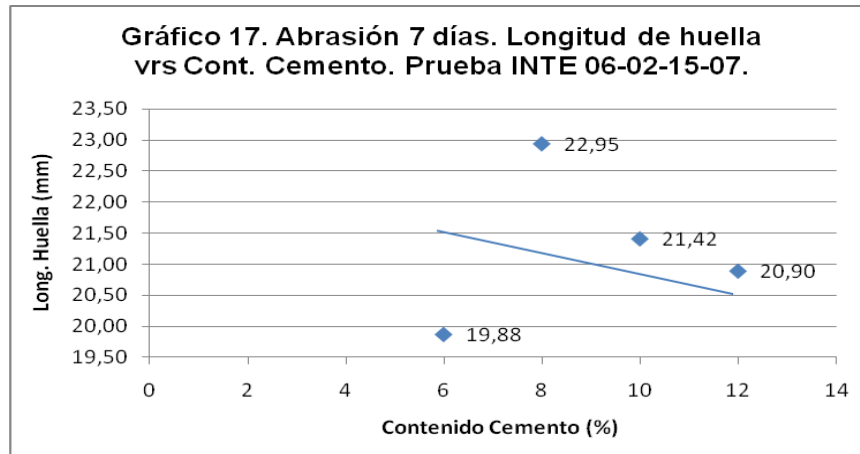
Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 59. Resultados Abrasión Suelo-Cemento 7 días. Norma INTE 06-02-15-07.						
Item	Long. Desg (mm)	Anc. Huella extr.1 (mm)	Anc. Huella extr.2 (mm)	Acepta/Rechaza	lh (mm)	Condición lh
P1-12%	25,46	25,08	25,52	Acepta	25,86	Rechaza
P2-12%	17,35	17,77	17,74	Acepta	17,75	Rechaza
P3-12%	20,68	20,78	19,71	Acepta	21,08	Acepta
P4-12%	21,57	21,88	21,99	Acepta	21,97	Acepta
P5-12%	19,64	19,74	19,85	Acepta	20,04	Acepta
P6-12%	18,62	18,76	18,72	Acepta	19,02	Acepta
P7-12%	20,16	20,32	20,88	Acepta	20,56	Acepta

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 60: Estadística-Resultados Resist. Abrasión. Tabla 59.	
Promedio	20,90
Mediana	20,56
Desviación	1,06
Varianza	6,68

Elaborado con el programa Microsoft Excel.



Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 61. Resultados Abrasión Suelo-Cemento 7 días. Prueba de ASTM C 944-99.

Item	Ws antes prueba (gr)	W desp 1er ciclo (gr)	W desp 2do ciclo (gr)	W desp 3er ciclo (gr)	% Perd. total
P1-6%	543,8	532,22	525,26	521,35	4,13
P2-6%	558,15	554,41	551,85	549,93	1,47
P3-6%	522,35	519,11	515,49	Se quebró	
P4-6%	528,97	526,62	523,62	520,22	1,65
P5-6%	576,94	572,78	568,38	564,11	2,22

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 62: Estadística-Resultados Resist. Abrasión. Tabla 61.

Promedio	2,37
Mediana	1,94
Desviación	0,70
Varianza	1,48

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 63. Resultados Abrasión Suelo-Cemento 7 días. Prueba de ASTM C 944-99.

Item	Ws antes prueba (gr)	W desp 1er ciclo (gr)	W desp 2do ciclo (gr)	W desp 3er ciclo (gr)	% Perd. total
P1-8%	528,5	527,39	526,53	525,68	0,53
P2-8%	541,72	538,9	533,3	526,17	2,87
P3-8%	578,62	576,98	575,48	571,96	1,15
P4-8%	565,9	565,27	563,98	563,07	0,50
P5-8%	559,94	558,54	557,36	556,56	0,60

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 64: Estadística-Resultados Resist. Abrasión. Tabla 63.	
Promedio	1,13
Mediana	0,60
Desviación	0,50
Varianza	1,01

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 65. Resultados Abrasión Suelo-Cemento 7 días. Prueba de ASTM C 944-99.					
<i>Item</i>	<i>Ws antes prueba (gr)</i>	<i>W desp 1er ciclo (gr)</i>	<i>W desp 2do ciclo (gr)</i>	<i>W desp 3er ciclo (gr)</i>	<i>% Perd. total</i>
P1-10%	662,92	661,21	659,41	657,53	0,81
P2-10%	683,07	681,35	678,83	675,71	1,08
P3-10%	712,35	711,62	710,67	709,96	0,34
P4-10%	697,7	696,4	695,04	694,05	0,52
P5-10%	734,54	733,63	732,84	731,88	0,36

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 66: Estadística-Resultados Resist. Abrasión. Tabla 65.	
Promedio	0,62
Mediana	0,52
Desviación	0,16
Varianza	0,10

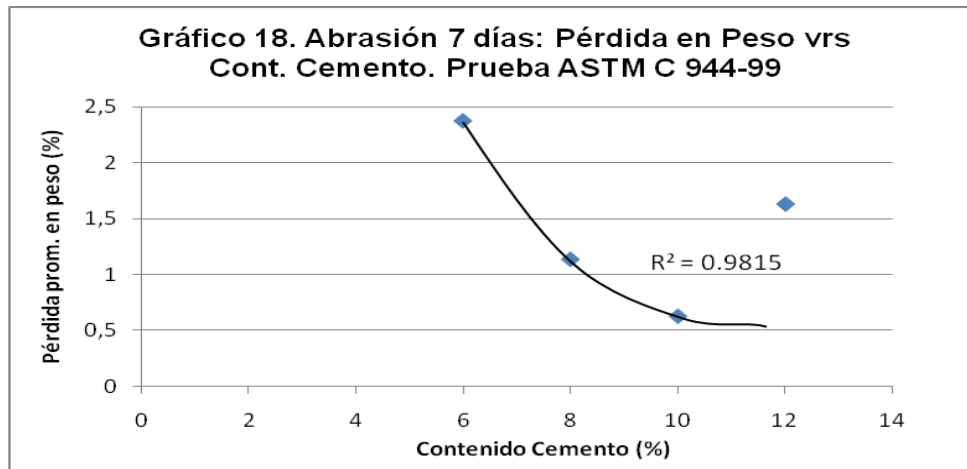
Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 67. Resultados Abrasión Suelo-Cemento 7 días. Prueba de ASTM C 944-99.					
<i>Item</i>	<i>Ws antes prueba (gr)</i>	<i>W desp 1er ciclo (gr)</i>	<i>W desp 2do ciclo (gr)</i>	<i>W desp 3er ciclo (gr)</i>	<i>% Perd. total</i>
P1-12%	706,04	701,51	696,25	690,14	2,25
P2-12%	765,21	763,78	762,39	760,85	0,57
P3-12%	849	847,4	846,5	845,6	0,40
P4-12%	650,5	642,32	639,53	638,49	1,85
P5-12%	594,23	585,61	581,08	576,04	3,06

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 68: Estadística-Resultados Resist. Abrasión. Tabla 67.	
Promedio	1,63
Mediana	1,85
Desviación	0,57
Varianza	1,28

Elaborado con el programa Microsoft Excel.



Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 69. Resultados Abrasión Suelo-Cemento 28 días. Norma INTE 06-02-15-07.						
Item	Long. Desg (mm)	Anc. Huella extr.1 (mm)	Anc. Huella extr.2 (mm)	Acepta/Rechaza	lh (mm)	Condición lh
P1-6%	18,25	18,39	18,26	Acepta	18,65	Rechaza
P2-6%	19,05	19,09	19,07	Acepta	19,45	Acepta
P3-6%	20,61	20,67	20,42	Acepta	21,01	Acepta
P4-6%	19,28	18,95	18,81	Acepta	19,68	Acepta
P5-6%	23,51	23,31	23,09	Acepta	23,91	Acepta
P6-6%	21,08	21,63	21,02	Acepta	21,48	Acepta
P7-6%	22,33	22,78	22,11	Acepta	22,73	Acepta

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 70: Estadística-Resultados Resist. Abrasión. Tabla 69.	
Promedio	20,99
Mediana	21,01
Desviación	0,77
Varianza	3,56

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 71. Resultados Abrasión Suelo-Cemento 28 días. Norma INTE 06-02-15-07.						
Item	Long. Desg (mm)	Anc. Huella extr.1 (mm)	Anc. Huella extr.2 (mm)	Acepta/Rechaza	lh (mm)	Condición lh
P1-8%	21,84	22,23	22,04	Acepta	22,24	Acepta
P2-8%	22,54	21,8	23,03	Acepta	22,94	Acepta
P3-8%	20,78	20,52	20,8	Acepta	21,18	Acepta
P4-8%	21,81	21,43	21,63	Acepta	22,21	Acepta
P5-8%	20,21	20,11	20,26	Acepta	20,61	Acepta
P6-8%	19,93	19,84	19,61	Acepta	20,33	Acepta
P7-8%	21,78	21,83	22,05	Acepta	22,18	Acepta

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 72: Estadística-Resultados Resist. Abrasión. Tabla 71.	
Promedio	21,67
Mediana	22,18
Desviación	0,40
Varianza	0,94

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 73. Resultados Abrasión Suelo-Cemento 28 días. Norma INTE 06-02-15-07.						
Item	Long. Desg (mm)	Anc. Huella extr.1 (mm)	Anc. Huella extr.2 (mm)	Acepta/Rechaza	lh (mm)	Condición lh
P1-10%	22,35	22,53	22,21	Acepta	22,75	Acepta
P2-10%	18	18,49	17,55	Acepta	18,4	Rechaza
P3-10%	19,28	19,21	19,68	Acepta	19,68	Acepta
P4-10%	19,66	19,77	19,63	Acepta	20,06	Acepta
P5-10%	20,57	20,77	20,71	Acepta	20,97	Acepta
P6-10%	20,97	21,14	20,58	Acepta	21,37	Acepta
P7-10%	20,19	20,24	19,91	Acepta	20,59	Acepta

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 74: Estadística-Resultados Resist. Abrasión. Tabla 73.	
Promedio	20,55
Mediana	20,59
Desviación	0,56
Varianza	1,88

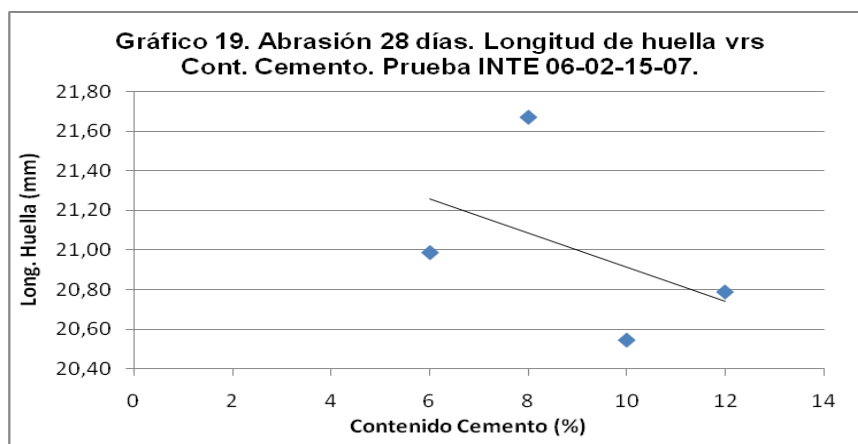
Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Item	Long. Desg (mm)	Anc. Huella extr.1 (mm)	Anc. Huella extr.2 (mm)	Acepta/Rechaza	lh (mm)	Condición lh
P1-12%	19,79	19,53	19,87	Acepta	20,19	Acepta
P2-12%	20,6	20,51	20,83	Acepta	21	Acepta
P3-12%	22,02	21,51	21,89	Acepta	22,42	Acepta
P4-12%	19,45	19,68	19	Acepta	19,85	Acepta
P5-12%	21,15	21,37	21,26	Acepta	21,55	Acepta
P6-12%	20,23	20,13	20,45	Acepta	20,63	Acepta
P7-12%	19,48	19,29	19,29	Acepta	19,88	Acepta

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Promedio	20,79
Mediana	20,63
Desviación	0,39
Varianza	0,90

Elaborado con el programa Microsoft Excel.



Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Item	Ws antes prueba (gr)	W desp 1er ciclo (gr)	W desp 2do ciclo (gr)	W desp 3er ciclo (gr)	% Perd. total
P1-6%	680,18	676,51	672,81	671,01	1,35
P2-6%	680,4	677,55	675,44	672,83	1,11
P3-6%	676,5	671,64	668,35	664,56	1,76
P4-6%	643,83	638,54	632,48	629,70	2,19
P5-6%	669,18	665,02	661,71	658,09	1,66

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 78: Estadística-Resultados Resist. Abrasión. Tabla 77.	
Promedio	1,62
Mediana	1,66
Desviación	0,21
Varianza	0,17

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 79. Resultados Abrasión Suelo-Cemento 28 días. Prueba de ASTM C 944-99.					
<i>Item</i>	<i>Ws antes prueba (gr)</i>	<i>W desp 1er ciclo (gr)</i>	<i>W desp 2do ciclo (gr)</i>	<i>W desp 3er ciclo (gr)</i>	<i>% Perd. total</i>
P1-8%	724,78	722,97	720,94	719,46	0,73
P2-8%	710,15	708,96	706,26	705,37	0,67
P3-8%	719,37	717,69	716,73	715,16	0,59
P4-8%	720,87	717,96	716,21	714,78	0,84
P5-8%	708,51	706,35	705,03	703,87	0,65

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 80: Estadística-Resultados Resist. Abrasión. Tabla 79.	
Promedio	0,70
Mediana	0,67
Desviación	0,50
Varianza	1,01

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 81. Resultados Abrasión Suelo-Cemento 28 días. Prueba de ASTM C 944-99.					
<i>Item</i>	<i>Ws antes prueba (gr)</i>	<i>W desp 1er ciclo (gr)</i>	<i>W desp 2do ciclo (gr)</i>	<i>W desp 3er ciclo (gr)</i>	<i>% Perd. total</i>
P1-10%	686,62	685,4	683,8	681,97	0,68
P2-10%	706,68	705,64	704,4	702,85	0,54
P3-10%	719,89	717,96	716,27	714,62	0,73
P4-10%	689,04	687,43	685,93	684,27	0,69
P5-10%	672,3	670,63	668,82	667,38	0,73

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 82: Estadística-Resultados Resist. Abrasión. Tabla 81.	
Promedio	0,68
Mediana	0,69
Desviación	0,04
Varianza	0,01

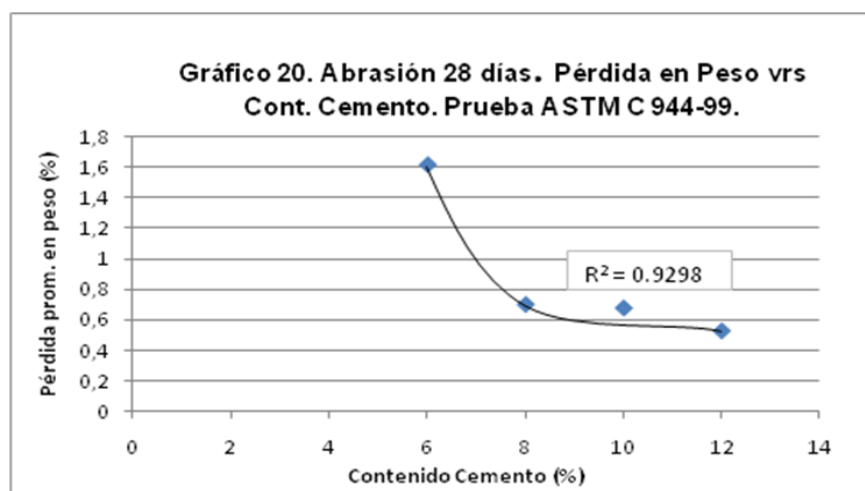
Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 83. Resultados Abrasión Suelo-Cemento 28 días. Prueba de ASTM C 944-99.					
<i>Item</i>	<i>Ws antes prueba (gr)</i>	<i>W desp 1er ciclo (gr)</i>	<i>W desp 2do ciclo (gr)</i>	<i>W desp 3er ciclo (gr)</i>	<i>% Perd. total</i>
P1-12%	752,13	750,01	749,02	748,41	0,49
P2-12%	728,02	726,71	725,23	724,32	0,51
P3-12%	751,93	750,77	749,34	748,13	0,51
P4-12%	719,98	718,14	717,07	716,29	0,51
P5-12%	728,92	727,62	726,01	724,53	0,60

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Tabla 84: Estadística-Resultados Resist. Abrasión. Tabla 83.	
Promedio	0,52
Mediana	0,51
Desviación	0,02
Varianza	0,00

Elaborado con el programa Microsoft Excel.



Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Análisis de los resultados

El suelo utilizado durante las pruebas es de tipo granular, conocido en el ambiente como aluvión, clasificado según la Norma ASTM D-3282 (Clasificación de suelos y mezclas de agregados para ser utilizados en la construcción de carreteras), como un suelo de tipo A-1-a, compuesto por grava, arenas y con presencia de material fino, de color café claro sin contaminación de materia orgánica.

Entre los aspectos más importantes se destacan que el suelo es no plástico, compuesto por partículas con un tamaño máximo de 2". Sobresale la presencia de cantos rodados, lo cual confirma que se trata de un material proveniente de un río.

De la curva granulométrica (Ver Gráfico 1) se desprende que el material tiene una graduación continua con presencia de partículas de todos los tamaños.

Cerca de un 52% del material pasa por el tamiz de la malla #4, un 17% lo hace por el tamiz de la malla #40 y el total del material que pasa la malla #200 es menor al 8%.

Este material está compuesto por limos, pues la prueba de precipitación de partículas suspendidas en agua se finalizó en menos de cinco minutos, además de la evidente formación de nubes de polvo durante la etapa de preparación del material.

Según el manual vigente de Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos, Carreteras y Puentes de Costa Rica (CR-77), este material puede clasificarse como un material de graduación A.

Asimismo, este material cumple con los requisitos dispuestos en el Capítulo 300 del mismo manual, en lo que se refiere a las especificaciones de graduación para suelos que se puedan estabilizar con cemento Portland. En este caso, para todas las pruebas realizadas en esta investigación, el cemento utilizado fue cemento Portland de uso general.

En cuanto a la absorción de los áridos, se evaluó esta propiedad por separado, tanto a los áridos gruesos como a los áridos finos. El porcentaje de absorción de la fracción fina del suelo fue de 7.22 %, mientras que el porcentaje obtenido para la fracción gruesa del suelo fue de 2.37%.

Es necesario conocer los valores de absorción de los agregados con el fin de tener un mejor control de la humedad del material en el momento de realizar la mezcla de suelo-cemento.

Con ayuda de la información suministrada por el cuadro 1 en el capítulo de metodología, se establece que el porcentaje óptimo de estabilización para un suelo A-1-a debe estar dentro del siguiente rango de porcentajes 5 y 7%.

Los porcentajes de cemento que se eligieron para realizar las pruebas en este proyecto fueron 4, 6, 8, 10 y 12 %.

Con la prueba Proctor se logró el porcentaje de agua necesario para el máximo grado de densificación del suelo para cada uno de los porcentajes de cemento.

La prueba se aplicó usando el método del Proctor modificado, reutilizando el material después de obtener la lectura del punto analizado en el momento. Esto debido a que se comprobó durante la prueba, que el material utilizado no era degradado de manera apreciable durante el período de compactación de la mezcla. Con un contenido de cemento de 4% se obtuvo una densidad seca máxima de 2192,54 kg/m³, relacionado a una humedad óptima de 8.54%.

Al variarse el contenido de cemento a 6%, se logró una densidad seca máxima de 2161,86 kg/m³ con una humedad óptima cercana al 9%.

El suelo-cemento con un contenido de cemento de 8% alcanzó una densidad seca máxima de 2181,27 kg/m³ con un contenido de humedad de 8.86%.

En la mezcla de suelo-cemento que contenía un 10% de cemento en su composición,

obtuvo una densidad seca máxima de 2169,10 kg/m³ a una humedad óptima de 7.61%. Finalmente, se alcanzó una densidad seca máxima de 2161,63 kg/m³ a un grado de humedad de 7.20%, para el suelo con un contenido de cemento de 12%.

Como se pudo apreciar, para todos los porcentajes de cemento se obtuvieron densidades bastante altas, producto de la adición de cemento al suelo y obviamente, de la energía de compactación aplicada durante la prueba.

En las pruebas con mezclas de 4, 6 y 8% de contenido de cemento, los valores tanto de las densidades logradas como de las humedades necesarias para alcanzarlas fueron similares entre sí, encontrándose las diferencias en un rango de +/- 30 kg/m³ en cuanto a la densidad, y en un rango de +/- 0.50% para la humedad.

Al aumentarse los porcentajes de cemento a 10 y 12 respectivamente, se obtuvo una disminución considerable del agua necesaria en la mezcla, sin que esto significara una disminución considerable en la densidad alcanzada por el suelo durante la compactación. Esto se da porque el cemento logra ocupar de una mejor manera los espacios libres entre las partículas del suelo, logrando así una buena densificación del suelo en presencia de una menor cantidad de agua en la mezcla.

Tal y como se menciona en la sección del Marco Teórico, el agua comprende en promedio del 10 al 20% por peso seco total de la mezcla, ya sea para suelos granulares o para suelos plásticos respectivamente (Avitia, R., 1972).

En los resultados obtenidos, se puede apreciar que para un suelo granular como el utilizado para realizar los ensayos, el porcentaje de agua necesario para compactar el suelo fue menor al 10%, independientemente del porcentaje de cemento utilizado en la estabilización del mismo.

Sobre la resistencia a compresión de las diferentes mezclas del suelo-cemento, se tiene que el comportamiento presentado por éstas es tal cual como se describe en la teoría.

La resistencia a la compresión para una misma mezcla de suelo-cemento aumenta con la edad y con la dosificación de cemento.

Las resistencias obtenidas durante el ensayo para cada una de las mezclas de suelo-cemento, fueron bastante altas. De hecho, en el cuadro 3 del capítulo de resultados, se puede observar que en general, todas las mezclas

excedieron las especificaciones en cuanto a la resistencia a la compresión a la edad de 7 días, contenidas en los manuales de Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos, Carreteras y Puentes de Costa Rica (CR-77) y el CR-2002. En este caso, sólo la mezcla con un contenido de cemento de 4% excedió el mínimo valor permitido en dichos manuales, las demás mezclas excedieron el valor promedio contenido dentro de estas especificaciones.

Este fenómeno puede ser analizado desde el punto de vista de la preparación de la probeta, donde al aplicarse una mayor cantidad de energía durante el proceso de compactación (Proctor modificado), se logra una mayor densificación del suelo y, por consiguiente, se obtiene un mejor comportamiento de las probetas ensayadas.

Para las probetas con 4% de cemento en su composición, la resistencia a la compresión tuvo un resultado cercano a los 31 kg/cm² a la edad de 7 días, llegando hasta un valor cercano a los 40 kg/cm² a la edad de los 28 días, todos estos valores representan promedios.

Las probetas con un contenido de cemento de 6%, mostraron una resistencia cercana a los 44 kg/cm² a la edad de los 7 días, llegando esta a alcanzar un valor de 51 kg/cm² a los 28 días.

Las probetas con un porcentaje de cemento igual a un 8%, registraron un valor promedio de resistencia a la compresión cercano a 48 kg/cm² a los 7 días, pasando este a un valor de 76 kg/cm² a los 28 días de edad.

El valor de la resistencia a la compresión a los 7 días registrado para las probetas preparadas con una mezcla con un contenido de cemento igual al 10% fue cercano a los 49 kg/cm², aumentando este valor hasta los 80 kg/cm² a la edad de los 28 días.

Asimismo, los especímenes fabricados con un 12% de cemento alcanzaron una resistencia a la compresión a la edad de 7 días de 60 kg/cm², aumentando esta a la edad de 28 días hasta el valor de 84 kg/cm².

Como se puede apreciar, la resistencia a la compresión registrada para una misma mezcla de suelo-cemento, presentó un aumento en el valor registrado a los 28 días entre el rango de un 25 a un 45% del valor registrado a la edad de los 7 días.

Tomando en cuenta la varianza de los datos registrados para cada mezcla de suelo-

cemento preparada, se tiene que en la mayoría de los casos, la varianza asociada presentó valores relativamente bajos, sobresaliendo los resultados alcanzados para esta variable para las probetas preparadas con un 12% de cemento. Aquí es donde se presentan precisamente los valores más altos, logrando alcanzar hasta un valor de 55 para las probetas preparadas con este porcentaje para fallar a la edad de 7 días.

En cuanto a esto, se debe analizar una serie de situaciones, entre las que se encuentran la forma en la cual reaccionó el suelo al añadirse este porcentaje de cemento, considerando que el cuadro 1 propone para este tipo de suelo, un rango de porcentajes de cemento que se encuentra entre 5 a 7%, dentro del cual se obtiene un adecuado comportamiento del material estabilizado.

Analizando la distribución de las partículas de suelo en la mezcla, tanto gruesa como fina, se tiene que ésta es un parámetro que es imposible de controlar, incluso para una cantidad de mezcla tan pequeña que permita moldear 3 especímenes.

La importancia de este aspecto radica en que, por ejemplo, mencionando la granulometría del suelo, se tiene que el agregado cuyo tamaño de las partículas ronda de 25 a 2 mm, aporta fricción, resistencia al impacto, resistencia al desgaste y dureza al conjunto. Las partículas de suelo cuyo tamaño se ubica entre los tamices 10 y 40, aportan fricción y dureza al material. Asimismo, las partículas cuyo tamaño se encuentra ubicado entre los tamices 40 y 200 tienen la función de producir el acunamiento del material grueso. Las partículas más finas como el limo y la arcilla actúan como relleno, impidiendo así el movimiento de las partículas más grandes (Cordero, M., 1991).

De ahí que la resistencia de las probetas se pueda ver afectada por la distribución de las partículas por unidad de volumen de esta.

Otra situación que se debe valorar al respecto tiene que ver con la influencia del coronamiento de la probeta en la resistencia alcanzada por esta. Aquí, una superficie irregular genera concentraciones de esfuerzo en partes puntuales de la probeta, debido a que se reduce el área de aplicación de la carga, produciendo que la falla de la probeta se dé a una magnitud de carga mucho menor que la obtenida si se tuviese una superficie totalmente plana. De igual forma, se desconoce el efecto que produce por

ejemplo, coronar una probeta con un espesor mayor al que se recomienda en la norma.

Dentro de las limitaciones presentadas durante el desarrollo de la investigación, se debe mencionar que fue imposible utilizar una sola mezcla para preparar las nueve probetas fabricadas con un mismo porcentaje de cemento, debido a que no era posible moldear esa cantidad en un tiempo de 2:30 minutos con un sólo operador, por lo que se corría el riesgo de que la mezcla fabricada se perdiera.

Esta limitación aumenta la variabilidad de los datos, entonces se debe tomar en cuenta otras variantes como la temperatura y la humedad relativa del ambiente en el momento de efectuarse la preparación de las probetas entre otras. Estos factores influyen en la humedad de la mezcla, produciendo por ejemplo, una mayor o menor evaporación de esta dependiendo de la temperatura que se alcance a lo largo del día.

Además, hay que tomar en cuenta la variabilidad que se puede asociar a los resultados obtenidos, producto de la manipulación de la mezcla y la ejecución del ensayo por parte del operador (error humano), así como la incertidumbre asociada a los instrumentos utilizados (balanzas, buretas, máquina, etc).

La resistencia al intemperismo fue analizada aplicando el ensayo de ciclos de saturación-secado.

Se evaluaron tres probetas para cada mezcla de suelo-cemento y se fallaron a los 7 días como dice la Norma. Las probetas se prepararon utilizando el método de Proctor modificado.

De manera general, se obtuvieron muy buenos resultados. Como se predice en la teoría, mediante esta prueba se pudo constatar que el valor de la resistencia al intemperismo aumenta al aumentarse la cantidad de cemento en la mezcla. Asimismo, no fue posible determinar cambios volumétricos en las probetas durante la aplicación de la prueba, ya que estos no eran perceptibles con el aparato utilizado (Vernier) al tomar las mediciones. De todas formas, la teoría predice este comportamiento para probetas realizadas con suelos granulares.

Para las probetas de la mezcla de suelo-cemento con un 4% de cemento en su composición, para cada una de las tres probetas se registraron los valores de pérdida en porcentaje de peso ubicados en el rango de 10.5 a 13.2%. El resultado promedio de la pérdida

debida a la prueba es de 11.71% para esta mezcla.

Las pérdidas registradas en peso para las probetas con un contenido de cemento igual al 6% se ubican en el rango de 2.3 a 6.2%. El valor promedio registrado del porcentaje de pérdida para estas probetas fue de 4.37%.

En las probetas con un 8% de cemento, las pérdidas se ubican dentro de un rango de 1.4 a 3% aproximadamente. El promedio registrado para esta tripleta de datos es de 1.97%.

Al evaluarse el porcentaje de pérdida en peso para las probetas con una dosificación de 10% de cemento, los resultados obtenidos se ubican dentro del siguiente rango, de 1.8 a 3.1%. El promedio registrado para estos datos fue de 2.58%.

Asimismo, los resultados obtenidos para el porcentaje de pérdida en peso para las probetas hechas con una mezcla de suelo-cemento con 12% de cemento se encuentran dentro del siguiente rango de valores, de 0.5 a 3.6%. El promedio de estos registra un valor de 1.63%.

Con ayuda de la gráfica 16, se puede ver que el porcentaje de pérdida de peso disminuye de manera considerable, al aumentar el contenido de cemento en la mezcla, la excepción se da para las probetas con un contenido de cemento de 10%, las cuales registran un valor de pérdida promedio mayor que el registrado para las probetas con 8% de cemento. Este resultado se da debido a que aquellas con un 10% de cemento, desde el primer ciclo, perdieron mucho material en una de las bases. Precisamente la base afectada es la que resulta después de realizar el proceso de enraizar la probeta en el molde de la prueba de Proctor, después de haber retirado el collar del molde. Al parecer, el material utilizado para enraizar el molde después de retirar el collar no se integró totalmente a la probeta y originó más bien una zona muy susceptible a los cambios volumétricos, tal y como se muestra en la siguiente fotografía.

Es importante mencionar que la resistencia al intemperismo de las probetas aumentó considerablemente hasta llegar al 8% de contenido de cemento en la mezcla, después de este porcentaje, el aumento en la resistencia no fue tan significativo.



Figura 11. Probetas para la prueba Ciclos de Saturación-Secado.

Con respecto de los resultados esperados de acuerdo con a la Norma, se tiene que el porcentaje de pérdida aceptable se ubica dentro del siguiente rango de 0 – 6% para un suelo A-1-b. La Norma no menciona nada en particular para un suelo tipo A-1-a, pero se realizó siempre la comparación. A partir de aquí, se descartó el porcentaje de 4% de cemento, ya que a pesar de ser compactado mediante el método Proctor modificado, el promedio del porcentaje de pérdida registrado para estas probetas ronda el valor de 11%. Para todos los demás especímenes, el porcentaje de pérdida por peso se ubicó dentro del rango de comparación.

Sobre la varianza de estos datos, los valores obtenidos son bajos, todos menores a 4, considerándose esto como satisfactorio.

Es necesario mencionar que estos resultados pueden verse afectados por la incertidumbre asociada a la naturaleza del material, ya que es imposible asegurar que todas las mezclas de suelo-cemento utilizadas hayan sido dosificadas de manera semejante.

Además, hay que tomar en cuenta la incertidumbre asociada al proceso de manufactura de las probetas, así como durante la aplicación de la prueba, sin olvidar la incertidumbre asociada a los instrumentos de medición utilizados. Por ejemplo, la Norma habla de la necesidad de aplicar una carga de 3 lb cuando se efectúa el cepillado de la probeta, pero esta carga puede variar con el movimiento del cepillo sobre la probeta y para cada vez que se realice el cepillado en cada ciclo.

En cuanto a los resultados obtenidos durante las pruebas de abrasión, los ensayos se efectuaron para cuatro porcentajes de cemento, se ensayaron siete probetas para los 7 y 28 días

de falla por cada porcentaje de cemento en la máquina colombiana de abrasión para adoquines (Norma INTE 06-02-15-07) y en la máquina para abrasión de superficies de mortero y de concreto (Norma ASTM C 944-99).

Aquí los resultados obtenidos no suministran mucha información, debido a que el comportamiento del material no manifestó alguna tendencia que permitiera predecir algún comportamiento específico del material bajo las condiciones de ensayo, principalmente con los datos obtenidos en la máquina colombiana para la abrasión en adoquines, ya que los resultados obtenidos se comportan de manera aleatoria. Esto quiere decir que la relación existente entre las variables de contenido de cemento y edad de la mezcla, con respecto de la longitud de huella en la probeta, es muy baja, la variabilidad de los datos cubierta asociado a la relación, R^2 , tiene un valor cercano a 25% (Ver información en la sección de Anexos).

Para las probetas fabricadas con el contenido de cemento de 6% y falladas a los 7 días, la longitud de huella varió dentro del rango de 18.35 mm hasta el valor de 23.22 mm. Según la Norma, para que una huella sea aceptada, la longitud resultante de la huella l_h se debe ubicar dentro del rango de 20 a 23 mm con +/- 1mm de tolerancia, sin olvidar que está establecido para cuando el material evaluado sea adoquín.

El suelo-cemento fue ensayado según el procedimiento descrito en la Norma, utilizando la carga que se aplica a los adoquines.

Como se puede apreciar en la tabla 53 de la sección de Resultados, se rechazó dos probetas debido a que la longitud de la huella resultante dio valores menores al rango establecido.

Con las probetas falladas a los 28 días, los resultados obtenidos para este porcentaje de cemento se ubican en el rango de 18.6 mm a 23.9 mm, dándose el rechazo de una probeta debido a que su huella fue menor que la establecida como aceptable.

La longitud de huella obtenida para la probetas fabricadas utilizando un 8% de contenido de cemento, falladas a los 7 días, se ubican en el rango desde los 21.34 mm hasta los 25.38 mm. Aquí fue necesario descartar dos probetas, debido a que el resultado de las huellas obtenidas está por encima del límite superior permisible estimado por la Norma.

A los 28 días, las probetas con este porcentaje de cemento registraron resultados que van desde los 20.3 mm hasta los 22.95 mm, por ello se aceptaron todas las siete probetas ensayadas.

Con las probetas con contenido de cemento igual al 10%, falladas a los 7 días, el rango de variación de los resultados fue de los 19,9 mm a los 23,7 mm. En este caso, los resultados se ubican dentro de los requisitos establecidos para este tipo de prueba, para evaluar las huellas efectuadas en adoquines.

Los resultados registrados para las probetas con este contenido de cemento, falladas a los 28 días, se ubican en un rango que va desde los 18.4 mm hasta los 22.8 mm. Fue necesario descartar una probeta, ya que la longitud de huella obtenida se ubica por debajo de la tolerancia indicada.

Con las probetas con 12% de contenido de cemento, la falla a 7 días mostró resultados ubicados en el rango de los 17.75 mm a los 25.86 mm. Por medio del criterio utilizado para valorar las huellas hechas en adoquines, se descartaron dos resultados que se ubican fuera del rango de tolerancia establecido de 20 a 23 mm con +/- 1 mm.

A los 28 días, los datos obtenidos se ubican dentro del siguiente rango, desde los 19.8 mm hasta los 22.45 mm. Como se puede apreciar, ninguna probeta fue descartada.

En cuanto a la varianza de los datos, en todos los casos fue muy baja, siendo el valor más alto registrado de 6.68, correspondiente a las probetas con 12% de cemento, falladas a los 7 días.

Estos valores son relativamente bajos, debido probablemente a que se tuvo la oportunidad de fallar siete probetas por cada fecha y porcentaje de cemento.

A pesar de esto, los datos obtenidos, no muestran alguna tendencia de comportamiento particular, Esto se da probablemente porque las probetas fueron aserradas y falladas en la cara aserrada. Esto provocó que partículas de agregado grueso, con un tamaño cercano a los 10mm, quedaran expuestas, evitando que se desgastaran las probetas por el efecto de la abrasión con la arena y el disco (Ver figura 12).

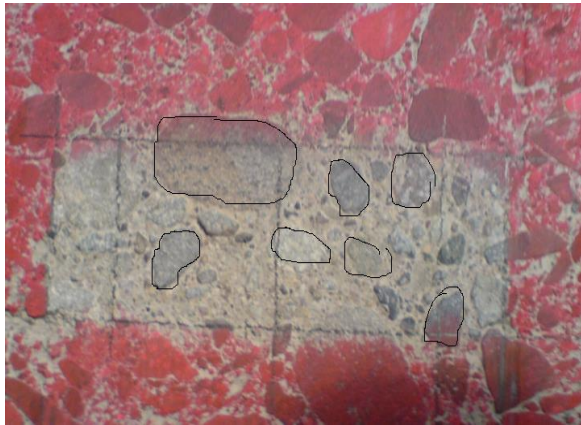


Figura 12: Distribución de las partículas en las probetas aserradas.

Debido a esta situación, se recomienda trabajar estas probetas mediante el moldeo de los especímenes, con el fin de estudiar más a fondo los resultados obtenidos para este procedimiento de prueba y la relación que guarda la distribución de los diferentes tamaños de partículas del suelo en la probeta, con la resistencia a la abrasión.

En la prueba de abrasión para superficies de mortero y concreto, regida por la Norma ASTM C944-99, los resultados mostraron que existe una leve mejoría con respecto de la pérdida de peso de las probetas falladas a los 28 días que los resultados obtenidos a los 7 días. También es perceptible una mejoría en el rendimiento de las probetas al aumentar el porcentaje de cemento en la mezcla de suelo-cemento.

Los resultados para las probetas con un contenido de cemento de 6% a los 7 días se ubica en el rango que va desde 1.47 % de pérdida en peso hasta un valor de 4.13%. En estas pruebas, fue necesario descartar una de las probetas debido a que se quebró durante la prueba (Ver figura 13). A pesar de esto, el promedio registrado de pérdida de peso de la mezcla de suelo-cemento fue de 2.37%.

A los 28 días los resultados obtenidos de abrasión se ubican dentro del rango de 1.1 a 2.2% de pérdida. El promedio calculado fue de 1.62%.

Con las probetas de 8% de contenido cemento, los resultados registrados para la pérdida en peso a los 7 días se centran dentro del rango de 0.5% hasta 2.9%. El promedio calculado de pérdida es de 1.13%.



Figura 13. Probetas con 6% de cemento, falladas a los 7 días bajo la norma ASTM C 944-99.

A los 28 días, las probetas reportaron pérdidas que van desde 0.6% hasta 0.85% en peso. El valor promedio fue cercano a 0.70%.

Las probetas realizadas con una mezcla de suelo-cemento con 10% de cemento tuvieron el siguiente rango de pérdida en porcentaje de peso a los 7 días, desde 0.35% hasta 1.1%. El valor promedio registrado para esta tripleta de datos es de 0.62%.

Para probetas falladas a los 28 días, moldeadas con la misma dosificación de mezcla, los resultados se ubican dentro del rango que va desde 0.5% hasta 0.75%. El valor promedio de este rango de datos corresponde a 0.68%.

Asimismo, en las probetas con un contenido de cemento de 12%, los resultados a los 7 días registran valores que van desde 0.5% hasta un 3%. El valor promedio calculado es de 1.63%.

Al fallar a los 28 días otras probetas hechas con una mezcla de igual dosificación, los resultados registrados van desde 0.5% hasta 0.6%. El valor promedio registrado es de 0.52%.

Es necesario mencionar que las probetas elaboradas para fallar a los 7 días, sufrieron en mayor medida durante el proceso de aserrado (Ver Cap. Metodología). Esto provocó que registraran pérdidas de suelo, no producto de la acción abrasiva del disco cortador, sino en otras secciones, donde, por el efecto de los cortes realizados, mucho material se desprendía de ella, debido a la manera en la que esta era fijada a la máquina, mediante una prensa mecánica.

Otra situación que se podría analizar es la variabilidad aportada a la secuencia de datos, debido a la manipulación de los materiales y a la ejecución del ensayo por parte del operador. De

la forma como se realizó la prueba, el operador estuvo forzado a reaccionar en cuestión de fracciones de segundo para realizar la acción de apagar la máquina en el momento justo en que se cumplieran los dos minutos de duración de cada ciclo.

Al igual que en el caso de las pruebas de abrasión con la máquina colombiana para evaluar el efecto de la abrasión en adoquines, es necesario estudiar más a fondo el efecto de la distribución de las partículas con su diferente tamaño en la resistencia a la abrasión de un suelo-cemento.

La varianza de los resultados de abrasión según la Norma ASTM C944-99 (Resistencia a la abrasión en superficies de concreto y de mortero) se mantuvo en valores muy bajos, siendo el mayor valor registrado para esta variable estadística igual a 1.5.

De los gráficos 18 y 20 de la sección de Resultados, se puede apreciar que los datos obtenidos para las probetas de abrasión de los porcentajes de cemento de 8, 10 y 12% se mantienen en valores muy parecidos entre sí. Del mismo modo en las pruebas de compresión y resistencia al intemperismo, muestran que se logra muy poca mejoría en la reacción del suelo a partir del porcentaje de cemento de 8%. Por lo tanto, de manera experimental, se propone este valor como porcentaje para estabilizar este tipo de suelo de manera adecuada para comenzar con la etapa de pruebas de campo, con la intención de evaluar la propiedad de la resistencia a la abrasión del material en las condiciones de uso normales.

Conclusiones

- El suelo estudiado es un suelo no cohesivo, es no plástico y se clasifica según la Norma ASTM D-3282 (Clasificación de suelos y mezclas de agregados para ser utilizados en la construcción de carreteras), como un suelo tipo A-1-a.
- El suelo cumple con las especificaciones contenidas en los manuales de Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos, Carreteras y Puentes de Costa Rica (CR-77) y con el CR-2002 en cuanto a la distribución granulométrica y a la plasticidad para ser utilizado como subbase y base estabilizada con cemento Portland.
- El suelo-cemento cumple con las especificaciones contenidas en los manuales de Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos, Carreteras y Puentes de Costa Rica (CR-77) y con el CR-2002 en cuanto a los valores mínimos de la resistencia a compresión solicitados para los siguientes tipos de bases estabilizadas: BE-25 y BE-35.
- Las mezclas de suelo-cemento preparadas con los contenidos de cemento de 6, 8, 10 y 12%, cumplieron con los valores de pérdida en peso preestablecidos en la Norma ASTM D 559-03 (Ensayo ciclos de saturación-secado para mezcla de suelo-cemento), para un suelo tipo A-1-b.
- Fue imposible determinar de manera clara, la relación existente entre la resistencia a la abrasión de un suelo-cemento y el contenido de cemento utilizando la Norma INTE 06-02-15-07 (Resistencia a la abrasión en adoquines).
- La relación existente entre la resistencia a la abrasión de las mezclas de suelo-cemento y su evolución en el tiempo, mediante la metodología planteada para evaluar esta propiedad mecánica utilizando la Norma INTE 06-02-15-07 (Resistencia a la abrasión en adoquines) es muy baja.
- La resistencia a la abrasión del suelo-cemento evaluado con la Norma ASTM C 944-99 (Resistencia a la abrasión en superficies de concreto y de mortero), aumenta con la edad y con el contenido de cemento en la mezcla.
- La mezcla de suelo-cemento efectuada con un contenido de cemento igual a 8%, es la mezcla que presenta un mejor comportamiento en todas las resistencias evaluadas en este trabajo, tomando en cuenta el poco desarrollo de estas propiedades, en los resultados obtenidos para las probetas con contenidos de cemento mayores a éste.

Recomendaciones

- Realizar un análisis de repetitividad y reproducibilidad para definir la metodología para evaluar la resistencia a la abrasión en un suelo-cemento.
- Asignar más personal para efectuar las pruebas, con el fin de poder trabajar todas las probetas con un mismo porcentaje de cemento al mismo tiempo y así reducir la variabilidad en los datos, producto de los cambios constantes en las condiciones ambientales.
- Evaluar la resistencia a la abrasión en mezclas de suelo-cemento en la máquina de abrasión para adoquines, con probetas o en superficies moldeadas y no aserradas.
- La construcción de tramos de prueba con los diferentes porcentajes de cemento y someterlos a una misma carga de trabajo, con el fin de estudiar el comportamiento del material en sitio y correlacionarlo con los resultados obtenidos en el laboratorio.
- Valorar la resistencia a la abrasión en mezclas de suelo-cemento realizadas utilizando las diferentes clases de suelo en el laboratorio, con el fin de obtener las condiciones particulares con las cuales estos suelos presenten un buen desempeño en su uso como superficie de rodamiento en pavimentos.
- Evaluar el comportamiento de las mezclas de suelo-cemento utilizando otros criterios de prueba como lo puede ser la Norma ASTM C 1138-9, para evaluar la abrasión en superficies de concreto sumergido en agua.

Apéndices

Esta sección contiene el Cuadro 1 contenido en el capítulo de Metodología que muestra los contenidos de cemento requeridos según la AASHO (*American Association of State Highway Officials*) de los E.U.A, por cada tipo de suelo, con el fin de poder estabilizarlo exitosamente.

También se incluyen unas gráficas correspondientes al análisis estadístico realizado para cada conjunto de datos obtenidos de las resistencias evaluadas durante este proyecto. Este análisis se realizó con ayuda del programa Minitab 15.

Cuadro 1: Contenidos de cemento requeridos para los diferentes grupos de suelo.				
Grupo AASHO	Intervalos de cemento requerido		Cont. de cemento apropiado por peso	
	% por volumen	% por peso	Ensayo Proctor	Ensayo Durabilidad
A-1-a	5-7	3-5	5	3-5-7
A-1-b	7-9	5-8	6	4-6-8
A-2	7-10	5-9	7	5-7-9
A-3	8-12	7-11	9	7-9-11
A-4	8-12	7-12	10	8-10-12
A-5	8-12	8-13	10	8-10-12
A-6	10-14	9-15	12	10-12-14
A-7	10-14	10-16	13	11-13-15

Elaborado con el programa Microsoft Excel.

Anexos

En esta sección se anexa un total de 12 documentos relacionados con los estándares según los cuales se realizaron todos los ensayos que dieron origen a este trabajo. Los documentos contenidos son los siguientes:

Norma ASTM C 136-05.
Norma ASTM C 117-04.
Norma ASTM C 702.
Norma ASTM D 2216-98.
Norma ASTM D 4318-00.
Norma ASTM D 3282.
Norma ASTM D 558-03.
Norma ASTM D 559-03.
Norma ASTM D 1632.
Norma ASTM D 1633.
Norma ASTM D 1634.
Norma ASTM C 944.
Norma INTE 06-02-15-07.

Referencias

- Avitia, R. 1972. **SUELO-CEMENTO**. México. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. 165 p.
- Cordero, M. 1991. **PAVIMENTOS DE SUELO-CEMENTO PARA TRÁNSITO LIVIANO**. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. 80 p.
- De la Fuente, E. 1995. **SUELO-CEMENTO. USOS, PROPIEDADES Y APLICACIONES**. México. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. 50 p.
- Braja, D. 2001. **FUNDAMENTOS DE INGENIERIA GEOTECNICA**. México. International Thomson Editores, S.A. 52 p.
- Moya, L. 2007. **ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO-CEMENTO PARA CONSTRUCCIONES DE BASES ESTABILIZADAS**. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. 50 p