

1. CAPÍTULO N°1: INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

El cemento mezclado con el suelo mejora las propiedades de éste desde el punto de vista mecánico. Siendo los suelos por lo general un conjunto de partículas inertes granulares con otras activas de diversos grados de plasticidad, la acción que en ellos produce el cemento es doble. Por una parte actúa como conglomerante de las gravas, arenas y limos desempeñando el mismo papel que en el hormigón. Por otra parte, el hidrato de calcio, que se forma al contacto del cemento con el agua, libera iones de calcio que por su gran afinidad con el agua roban algunas de las moléculas de ésta interpuestas entre cada dos laminillas de arcilla. El resultado de este proceso es la disminución de la porosidad y de la plasticidad así como un aumento en la resistencia y en la durabilidad. Este tipo de estabilización es de uso cada vez más frecuente y consiste comúnmente en agregar cemento Portland en proporción de un 3% a un 16% por volumen de mezcla.

Desde 1935 más de 140,000 km de pavimentos suelo-cemento han sido construidos en Norteamérica. La performance demostrada por estos pavimentos a través de los años provee una valiosa información para el diseño, para los niveles de espesor que fueron utilizados. La mayoría de estos pavimentos en servicio son de 15 cm de espesor. Este espesor ha probado ser satisfactorio para las condiciones de servicio de caminos secundarios, calles residenciales y pistas de aterrizaje de tráfico ligero. Algunos pavimentos de 10 cm y 12.5 cm han sido construidos y han dado un buen servicio bajo condiciones favorables de tráfico ligero y fuerte resistencia del suelo. Muchos kilómetros de pavimentos de 17.5 cm y 20 cm de espesor están en servicio en caminos principales y vías secundarias de alto tráfico. Pavimentos con suelo cemento con espesores de 22.5 cm o mas no son numerosos, aunque algunos proyectos de aeropuertos han sido construidos con espesores de hasta 40 cm. En nuestro país actualmente se está utilizando cada vez con mayor frecuencia el uso de este mejoramiento, citando el ejemplo más importante la carretera del tramo Santa Cruz –

Puerto Suarez, esto debido a las grandes ventajas que produce el mismo en la construcción vial.

Para lograr un buen servicio en capas de suelo cemento es preciso conocer las propiedades del material y su comportamiento al variar sus elementos y sus respectivos proporcionamientos. Es por ello que el estudio de las propiedades se hace cada vez más importante, por lo que la investigación se enfoca en la determinación de algunas de las propiedades mecánicas del suelo-cemento como son: el módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y el CBR (Valor Soporte California), aplicando distintos porcentajes de cemento, además a diferentes edades de prueba, para un tipo de suelo Arena Arcillosa. Con estos resultados se realizara correlaciones matemáticas entre los mismos, y de esta manera obtener parámetros reales locales que nos sirvan para el diseño de pavimentos. Para tal efecto se realizaran ensayos de laboratorio de caracterización de los materiales tanto para el suelo como para el cemento como ser: Granulometría, límites de Atterberg, Densidad máxima y compactación, finura del cemento, etc. y se registrá bajo la norma AASTHO para tratamientos suelo – cemento.

También se presentan aspectos del suelo cemento como definiciones, aplicaciones, ventajas, desventajas, materiales que componen el suelo cemento, propiedades físicas y mecánicas, diseño de suelo cemento, proceso constructivo, control de calidad, etc. Con el fin de proporcionar al lector un panorama general y al mismo tiempo una herramienta que le permita optimizar el uso del suelo cemento.

1.2. SITUACIÓN PROBLÉMICA

Tradicionalmente se ha utilizado material granular para la conformación de las capas de la estructura de un pavimento, pero debido a factores económicos, técnicos y ambientales generados por la explotación de los bancos que proveen este material y las distancias de acarreo de las mismas, su uso se ha limitado principalmente en regiones alejadas y de difícil acceso, teniendo que buscar otras alternativas.

Es por eso que en regiones o localidades con pocos recursos económicos como tenemos en gran parte del territorio de nuestro país Bolivia, se requiere invertir de la forma más eficiente los fondos disponibles para el desarrollo de la red vial local y de esta manera

optimizar la distribución de los recursos económicos en diferentes ámbitos como salud, educación, seguridad, etc. Por tanto el método de mejoramiento de suelos a través de cemento puede ser una gran alternativa de ahorro de estos recursos y una solución técnica desde la parte de ingeniería.

Es fundamental contar con investigaciones sobre las propiedades del suelo cemento y como se correlacionan entre las mismas, para que a la hora de realizar el diseño de estructuras de pavimentos se cuente con parámetros acordes a nuestra realidad, además que nos faciliten el cálculo ya que conociendo la correlación entre estas propiedades, podamos partiendo de una conocer la magnitud aproximada de las otras, ahorrando de esta manera tiempos de operación en obra. En muchas ocasiones los valores utilizados en nuestro medio son extraídos de correlaciones de estudios realizados en otros países o simplemente son asumidos como valores constantes que pueden no adaptarse a las condiciones locales, generando diseños poco exactos y provocando que los pavimentos en un futuro inmediato sufran fallas de todo tipo, ocasionando esto una gran daño a la economía y progreso de las regiones. Por lo que se busca optimizar el uso del suelo cemento desde el punto de vista de espesores, porcentaje o cantidad de cemento, tipo de cemento y tipo de suelo, para el correcto diseño de un pavimento.

a) Problema:

¿Cómo correlacionar las propiedades mecánicas como ser: el módulo de elasticidad, resistencia a compresión y el CBR (Valor Soporte California), de un Suelo – Cemento (Arena – Arcillosa) para diferentes dosificaciones y edades del mismo?

1.3. ANTECEDENTES

Desde tiempos antiguos, el hombre ha buscado mantener al menos las condiciones mínimas de operación y funcionamiento de sus caminos, esto lo llevó a buscar nuevas alternativas de construcción y mantenimiento.

A través de los años se han desarrollado metodologías y técnicas tales como la utilización de materiales clasificados o selectos de bancos específicos que sean de buena calidad, otra técnica desarrollada fue la mezcla de materiales con el fin de modificar sus granulometría y su plasticidad; la utilización de materiales como la cal y otros conglomerantes puzolánicos en pequeñas cantidades mezcladas con suelo natural, todo esto con el objetivo de mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados en las vías.

El origen de la idea de mezclar suelo y cemento para producir un material con mejores propiedades, no ha sido establecido con exactitud. En los Estados Unidos la primera información oficial se refiere a una patente registrada en 1917 con el nombre de “soilamies”, para uso en carreteras, pero se tienen indicios de que hubieron intentos para combinar suelos con cemento que anteceden a esa fecha, pero no existe un registro formal y certero de estas experiencias. En 1920 se registró otra patente con el nombre de “soilcrete”, también para uso en carreteras. Fue hasta 1932 que oficialmente se comenzó a trabajar con este nuevo material, cuando el departamento de Carreteras del Estado de California del Sur, inicio investigaciones con mezclas de Suelo-cemento, bajo la dirección del Dr. C. H. Moorfiel; se hicieron diversas pruebas en caminos entre los años de 1933 y 1934 con variados espesores, obteniéndose un material endurecido de gran resistencia.

En América Latina en países más desarrollados en la parte vial como ser Colombia, Brasil, Chile, Argentina, este método es aplicado con mayor frecuencia gracias a los estudios realizados para cada país con la tecnología aplicada en los mismos. Un claro ejemplo es el Congreso Iberoamericano de pavimentos de concreto liderado a la cabeza por el país de Colombia, en el cual realizan una investigación profunda del comportamiento de este método de estabilización a partir de ensayos de laboratorio con

equipos sofisticados, estos nos brindan resultados precisos y muy confiables de las propiedades mecánicas de dicho material.

En nuestro país este método de mejoramiento se está utilizando con más frecuencia debido a los buenos resultados, a las grandes ventajas que nos brinda dicho mejoramiento con cemento. Un claro ejemplo es la carretera Santa Cruz – Puerto Suarez en los tramos de pavimento rígido obteniendo hasta la fecha un muy buen pavimento en excelentes condiciones. Por tanto en la actualidad se está utilizando con gran frecuencia este mejoramiento en las construcciones viales de nuestro país.

Este crecimiento se debe a las múltiples ventajas que tienen los suelos mezclados con cemento, por eso en nuestro país y en muchos otros países el uso de esta práctica ha tenido una gran aceptación.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General:

Proponer correlaciones entre el módulo de elasticidad, resistencia a compresión, y el CBR (valor soporte California), de un Suelo – Cemento (Arena Arcilloso) para diferentes dosificaciones y edades del mismo. Y obtener parámetros reales aproximados, que nos faciliten en el diseño y control de pavimentos.

1.4.2. Objetivos Específicos:

- ✓ Identificar y estudiar en la teoría los ensayos de laboratorio requeridos, para la determinación de las propiedades mecánicas del suelo cemento como ser: el módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y el CBR (valor soporte California).
- ✓ Realizar en laboratorio dosificaciones de suelo cemento utilizando el método AASTHO para los contenidos de cemento en peso del 3%, 6%, 9%, 12%. Utilizando arena arcillosa y cemento portland que cumpla la norma ASTM C-150 para el Tipo IP30.

- ✓ Realizar ensayos en laboratorio del módulo de elasticidad, resistencia a compresión y del CBR (valor soporte California), a edades de prueba de 3, 7, 28, 60, días, para las diferentes dosificaciones propuestas anteriormente.
- ✓ Establecer correlaciones entre dichas propiedades mecánicas en base a los resultados de los ensayos aplicando el método estadístico de la Regresión Múltiple con ayuda de un software estadístico.

1.5.HIPÓTESIS

Mediante ensayos de laboratorio se determinaran las propiedades mecánicas como ser: el Módulo de Elasticidad, el Esfuerzo a la Compresión y el CBR (valor soporte California), de un Suelo – Cemento (Arena Arcillosa) a diferentes dosificaciones y edades de prueba. Posteriormente aplicando el método estadístico de Regresión Múltiple Se conseguirá formular expresiones de correlación para obtener parámetros reales aproximados que nos faciliten en el diseño y control de pavimentos.

1.5.1. Definición de variables independientes y dependientes

Variable Independiente:

- ✓ Dosificaciones (3%, 6%, 9% y 12 %) y Edad de Prueba (3, 7, 28, 60 días).

Variable Dependiente:

- ✓ Correlación de las Propiedades Mecánicas (Módulo de Elasticidad, el Esfuerzo a la Compresión y el CBR).

1.5.2. Conceptualización y Operacionalización de las variables

Variable Independiente:

Tabla 1.1 Conceptualización y Operacionalización de la variable Independiente

| VARIABLE NOMINAL | CONCEPTUALIZACIÓN | OPERACIONALIZACIÓN | | |
|--|--|---------------------------------|--|---|
| | | DIMENSIÓN | INDICADOR | VALOR ACCIÓN Y TECNICAS |
| Dosificaciones (3%, 6%, 9% y 12 %) y Edad de Prueba (3, 7, 28, 60 días). | Realizar las diferentes dosificaciones (porcentajes de cemento) de Suelo - Cemento aplicando el metodo de la AASTHO, conformado por Arena Arcillosa y cemento portland con normativa ASTM C-150 para el Tipo IP30. y aplicar los ensayos a distintas edades de prueba de las muestras. | Mejoramiento Suelo - Cemento | Cemento (Portland ASTM C-150 IP 30) | Tipo de Cemento norma ASTM C-150 tipo IP30 Dosificación: Porcentaje de Cemento al 3%, 6%, 9% y 12% |
| | | | Suelo a Mejorar (Arena - Arcillosa) | Características y condiciones SN-AASTHO Preparación del suelo SN-AASTHO |
| | | | Agua | Condiciones, Cantidad y Curado SN-AASTHO |
| | | Edades de Prueba en Laboratorio | Realizacion de la prueba a los 3 días | Ensayo: Modulo Elast; Resist Compr; CBR (SN-AASTHO) Medicion e Interpretacion de Resultados |
| | | | Realizacion de la prueba a los 7 días | Ensayo: Modulo Elast; Resist Compr; CBR (SN-AASTHO) Medicion e Interpretacion de Resultados |
| | | | Realizacion de la prueba a los 28 días | Ensayo: Modulo Elast; Resist Compr; CBR (SN-AASTHO) Medicion e Interpretacion de Resultados |
| | | | Realizacion de la prueba a los 60 días | Ensayo: Modulo Elast; Resist Compr; CBR (SN-AASTHO) Medicion e Interpretacion de Resultados |

Variable Dependiente:

Tabla 1.2 Conceptualización y Operacionalización de la variable Dependiente

| VARIABLE NOMINAL | CONCEPTUALIZACIÓN | OPERACIONALIZACIÓN | | |
|---|--|---|---|---|
| | | DIMENSIÓN | INDICADOR | VALOR ACCIÓN Y TECNICAS |
| Correlación de las Propiedades Mecánicas (Módulo de Elasticidad, el Esfuerzo a la Compresión y el CBR). | Realizar ensayos de laboratorio para determinar el Modulo de Elasticidad, Resistencia a Compresión y el CBR (valor soporte California) para un suelo cemento. | Ensayos de Laboratorio para determinar las Propiedades Mecánicas | Ensayo de CBR (Valor soporte california) | Preparacion de la muestra según N-AASTHO Ensayo REFERENCIA ASTM D 1883 |
| | | | Ensayo determinación del Modulo de Elasticidad | Características y condiciones de las probetas ESTUDIO DEL MANEJO DEL EQUIPO A UTILIZAR Ensayo REFERENCIA ASTM D597-02 |
| | | | Ensayo determinación del Esfuerzo a Compresión | Características y condiciones de las probetas ESTUDIO DEL MANEJO DEL EQUIPO A UTILIZAR Ensayo REFERENCIA ASTM D 1633-96 |
| | | | Correlación: Modulo de Elasticidad vs Dosificación vs Edad de prueba | Correlación Multiple Regresión Multiple no Lineal Obtención de la Gráfica y Ecuación del Modelo Estadístico |
| | | | Correlación: Resistencia a Compresión vs Dosificación vs Edad de prueba | Correlación Multiple Regresión Multiple no Lineal Obtención de la Gráfica y Ecuación del Modelo Estadístico |
| | | | Correlación: C.B.R. vs Dosificación vs Edad de prueba | Correlación Multiple Regresión Multiple no Lineal Obtención de la Gráfica y Ecuación del Modelo Estadístico |
| | Mediante los valores obtenidos de los ensayos de laboratorio, se lograra formular expresiones de correlacion entre las variables como ser: 1)modulo de elasticidad vs porcentaje de cemento vs edad de prueba; 2)Resistencia a compresión vs porcentaje de cemento vs edad de prueba; 3) CBR (valor soporte California) vs porcentaje de cemento vs edad de prueba; y por ultimo la correlacion entre estas tres propiedades | Aplicación de un Metodo Estadístico, para determinar la relación existente entre las variables analizadas. "METODO DE REGRESIÓN MULTIPLE" | Correlación: Mod. Elast. Vs Resis. Compr. Vs C.B.R. | Correlación Multiple Regresión Multiple no Lineal Obtención de la Gráfica y Ecuación del Modelo Estadístico |

1.6.LIMITACIONES

Debido a la variedad de cementos existentes, se hace demasiado extenso realizar el proyecto de graduación incluyendo todos los tipos disponibles en el mercado local, por lo que la investigación se limitara al estudio del suelo-cemento, compuesto por el cemento más comercial y que existe en nuestra región como ser: Cemento Portland ASTM C-150 IP30 “Cemento el Puente” y un suelo areno-arcilloso que posteriormente en la caracterización del mismo se Clasificara según su granulometría y Limites de Atterberg mediante el método AASTHO al grupo de suelo que corresponda el mismo. La investigación está enfocada al uso de suelo cemento para propósitos viales.

1.7. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años la utilización de suelo cemento para la construcción de bases de pavimentos ha tenido una mayor aplicación, ya que en relación a las bases granulares, estas tienen múltiples ventajas, pero las más importantes son las siguientes:

No se producen cambios de volumen significativos en las subcapas, debido a la humedad o al secado; permite el reciclaje de material de un pavimento flexible existente, posee una alta resistencia para soportar grandes cargas, por eso el espesor de la estructura se reduce considerablemente del que sería necesario para una base granular no tratada con cemento y bajo las mismas condiciones de carga y subrasante; para la realización de la mezcla puede ser utilizado casi cualquier tipo de suelo que cumpla con las especificaciones del proyecto.

Cuando las capas estabilizadas tienen un buen desempeño se pueden obtener beneficios tanto técnicos como económicos por reducción de tiempos en los procesos constructivos, utilización de materiales nativos, disminución del impacto ambiental, disminución de costos de mantenimiento y a la vez se formulan nuevas alternativas de construcción y rehabilitación de estructuras de pavimentos.

Por lo que la investigación de las propiedades del suelo cemento propuestas en el trabajo y las correlaciones entre estas, son necesarias, por el hecho que en el diseño de estructuras de pavimentos dichas variables son determinantes, ya que los valores

utilizados hasta la fecha son extraídos de correlaciones de estudios realizados en otros países o simplemente son asumidos como valores constantes que pueden no adaptarse a las condiciones locales, generando diseños poco exactos. Por lo que se busca optimizar el uso de suelo cemento desde el punto de vista de espesores, porcentaje o cantidad de cemento, tipo de cemento y tipo de suelo.

Así mismo se pretende mejorar las practicas relacionadas con el uso de suelo cemento, proporcionando la información obtenida, la cual será de gran ayuda para que la utilización de este material sea más eficiente, ya que en la actualidad se cae en el error de no diseñar las mezclas y/o utilizar dosificaciones que no siempre serán las que mejor se adapten a los requerimientos específicos de un proyecto.

2. CAPÍTULO N°2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. GENERALIDADES DEL SUELO CEMENTO

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

2.2. DEFINICIONES

En cada país y a través del tiempo los investigadores le han dado distintas connotaciones al concepto del suelo-cemento; algunos consideraron el término en el sentido más amplio y otros lo restringen. Algunas de las definiciones que en la actualidad se utilizan son las siguientes:

- **Definición de La Portland Cement Association (PCA):**

El suelo-cemento: es una mezcla íntima de suelo, convenientemente pulverizado, con determinadas porciones de agua y cemento que se compacta y cura para obtener mayor densidad. Cuando el cemento se hidrata la mezcla se transforma en un material duro, durable y rígido. Se le usa principalmente como base en los pavimentos de carreteras, calles y aeropuertos.

- **Definición de El Grupo Holandés de Trabajo:**

El suelo-cemento y también el suelo estabilizado con cemento son una mezcla homogénea de suelo con cemento y agua que se compacta adecuadamente. El suelo tratado endurece por la reacción del cemento y el agua, por lo que mejora sus propiedades ingenieriles, lo cual favorece su uso en la construcción de carreteras.

- **Definición Para Coleman A. O'Flaherty (Londres, Inglaterra):**

“Es un material endurecido formado por el curado de una íntima mezcla de suelo, cemento y agua que se compacta”.

- **Definición ACI 230.1R: Suelo cemento-ACI 116R:**

Define el suelo cemento como “una mezcla de suelo y porciones medidas de cemento Pórtland y agua, compactada a alta densidad”.

El suelo cemento puede ser definido además como un material producido por el mezclado, compactación y curado de suelo/agregados, cemento Pórtland, ocasionalmente aditivos y/o puzolanas, para formar un material endurecido con específicas propiedades ingenieriles. Las partículas suelo, agregados son adheridas por la pasta de cemento, pero a diferencia que en las mezclas de concreto, las partículas individuales no son cubiertas completamente por la pasta de cemento.

- **Definición de El Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones:**

Define al suelo cemento como un material fabricado con suelos granulares o zahorras, cuyo contenido de cemento en peso suele ser del orden del 3 – 7%. A largo plazo, su resistencia a compresión suele ser superior a 4 MPa (Según las especificaciones incluidas en el PG3, a 7 días debe ser mayor de 2.5 MPa), y su módulo de elasticidad presenta valores del orden de 6,000 MPa con suelos granulares y superiores a 10,000 MPa si se emplean zahorras.

- **Suelo-Cemento Plástico (Según ACI Materiales de Resistencia Baja Controlada):**

Es un material cementante de consistencia fluida que permite su auto compactación, de resistencia inferior de 21 Kg. /cm² a 28 días. Consiste en una mezcla de suelo fino, cemento y agua suficiente para dar una consistencia fluida. Se utiliza principalmente en recubrimiento de taludes, apoyo de tuberías y revestimiento de cunetas. Su aplicación se hace generalmente con llana, lo cual refuerza el concepto que el suelo utilizado en la mezcla debe ser un material fino granular.

- **Suelo Modificado Con Cemento:**

Como su nombre lo indica, el cemento aquí es utilizado para modificar las propiedades físicas y químicas de algunos suelos para mejorar su capacidad de respuesta. Generalmente este proceso involucra bajas cantidades de cemento, razón por la cual se convierte en una buena alternativa en situaciones donde se necesita aumentar levemente la capacidad de respuesta del suelo con bajos costos. Aunque sabemos que la cal es más efectiva para cortar la plasticidad de los suelos, cuando utilizamos cemento estamos reduciendo plasticidad y aumentando resistencia.

- **Grava-Cemento:**

Este material podríamos ubicarlo en un punto intermedio entre los concretos y el suelo-cemento. Por lo tanto requiere de un proceso de elaboración más cuidadoso. Se caracteriza por altos contenidos de cemento que pueden oscilar entre 130 y 180 Kg./m³, obteniéndose resistencias de hasta 70 Kg./cm². Es normal entonces que ante contenidos tan altos de cemento su elaboración suela hacerse en una planta de mezclas en condiciones controladas, pues tanto las resistencias requeridas como las inversiones en materiales son mayores.

- **Suelo-Cemento:**

Para definirlo podemos decir que es una mezcla íntima de suelo pulverizado, cemento y agua que, en proporciones adecuadas, puede convertirse en un estupendo aliado al momento de defender la subrasante de las solicitudes del tráfico.

Lo anterior trae como consecuencia un material resistente y durable con excelentes propiedades mecánicas, que es ampliamente utilizado como base para pavimentos en un gran número de proyectos viales.

Debido a la cantidad de definiciones que se pueden encontrar relacionadas con el suelo cemento es necesario trabajar con una definición que sea acorde a nuestra investigación, como la siguiente:

“Suelo cemento o suelo estabilizado con cemento es una mezcla en seco de suelo o tierra convenientemente pulverizado con determinadas características

granulométricas, cemento Portland y con determinadas porciones de agua en algunos casos con aditivos, a la mezcla se la compacta y cura para obtener mayor densidad. Cuando el cemento se hidrata la mezcla se transforma en un material duro y rígido. Regularmente, el porcentaje de cemento portland puede variar entre el 3 al 12% dependiendo del tipo de suelo. Esta mezcla está destinada a mejorar las condiciones de estabilidad del suelo, en la cual mediante un análisis de laboratorio se establece el contenido, el tipo de cemento y la cantidad de agua necesaria para combinar con el suelo y cumplir con los requisitos mínimos de resistencia y durabilidad. La mezcla resultante se compacta rigurosamente con una energía de compactación específica, así las propiedades de este material son el resultado de la hidratación del cemento y la energía de compactación inducida.”

2.3. APLICACIONES DEL SUELO CEMENTO

Teniendo en cuenta las propiedades de las capas estabilizadas con cemento, es normal en todo el mundo, verlo aplicado en diferentes tipos de vías, su uso permite una gran flexibilidad, principalmente se ha aprovechado suelo-cemento para la construcción de bases y subbases de carreteras, cimentaciones, muros, aeropuertos, áreas de almacenamiento, protecciones de presas y protecciones contra la erosión de corrientes de agua.

Por su relativo bajo costo en la construcción de bases para pavimentos con tráfico industrial muy pesado, el suelo-cemento ha sido utilizado mundialmente para hacer terminales portuarias de minerales y contenedores, terminales de ferrocarriles, terminales de vehículos muy pesados, patios de almacenamiento industrial pesado y para soportar la carga de vehículos con ruedas de acero.

2.4. VENTAJAS DEL USO DEL SUELO CEMENTO

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

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

En algunas ocasiones, donde los bancos de material adecuado están muy alejados y sea incosteable o muy costosa su explotación, cabe la posibilidad de utilizar económicamente los bancos cercanos mediante tratamientos con cemento. Siempre y cuando el costo de éstos compita con los costos adicionales, esto es, aquéllos que se generan debido a la lejanía de los bancos que no requieren tratamiento; y todavía resulta mucho mejor, si se puede lograr un ahorro substancial tanto en dinero como en tiempos de construcción.

La base o subbase de suelo-cemento ya colocada y endurecida es bastante más rígida que las bases o subbases usuales de grava, lo que le permite transmitir mejor que ellas las presiones de las llantas a la subbase o subrasante dependiendo del tipo de pavimento. (Ver Fig. 2.1)

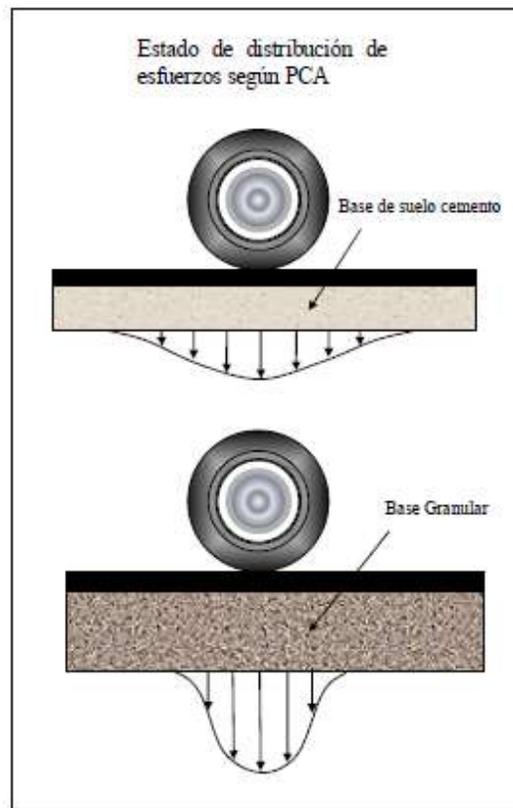


Figura 2.1 Distribución de presiones en las capas de pavimentos

Por presentar mayor rigidez es posible reducir el espesor requerido de los pavimentos tratados para transmitir las presiones aceptables en las capas inferiores. Esta disminución es muy deseable en la construcción de las pistas de los aeropuertos donde por los fuertes impactos que ocasionan las llantas de los aviones en los aterrizajes se requiere que se coloquen espesores considerables de bases granulares.

En casos de urgencias constructivas, su aplicación permite reducir considerablemente los tiempos de construcción normales si se utilizan las técnicas y maquinarias apropiadas.

Aunque su construcción es muy versátil y también puede hacerse con equipos muy sencillos para tener certeza de éxito se requerirá utilizar las técnicas, equipos y controles adecuados. Además de lo anteriormente expuesto el suelo cemento presenta las ventajas en las siguientes aplicaciones:

➤ **Mayor uso de materiales locales**

El suelo cemento permite la utilización de gran cantidad de tipos de suelo para su elaboración, lo que permite reducir considerablemente los costos de transporte de material de aporte y aumentar los rendimientos de construcción.

➤ **Material adecuado para diferentes tipos de vías**

Su versatilidad permite un excelente desempeño en todas las estructuras, desde los pavimentos flexibles, pasando por los articulados y finalmente en los rígidos donde su compatibilidad modular, permite que el desempeño estructural del conjunto en un pavimento rígido sea sustancialmente mayor que cuando son apoyadas las losas sobre materiales granulares.

➤ **Aporte a la solución de problemas de estabilidad, durabilidad y economía**

Al utilizar suelo cemento en la base o sub base de un pavimento, mejoramos sus propiedades mecánicas y se pueden estabilizar suelos que en otras condiciones se tendrían que reemplazar completamente.

El aspecto económico de una mezcla de suelo-cemento se relaciona con el ahorro en transporte del material por la estabilización de suelos nativos, los altos rendimientos constructivos y la relación modular de las capas donde se presentan ahorros importantes por la reducción de espesores de diseño.

➤ **Reducción del impacto sobre el medio ambiente**

Se puede reducir el impacto al medio ambiente ya que con el uso de suelo cemento ya no es necesario procesar materiales granulares y transportarlos a sitios remotos para ser utilizados como materiales de base y subbase.

Lo ideal sería analizar bien los componentes de los suelos nativos y agregar los elementos faltantes para lograr que éstos se comporten adecuadamente, reduciendo así el impacto que sobre el medio ambiente generen los proyectos viales.

Ventajas de la utilización de capas estabilizadas en pavimentos rígidos.

➤ **Disminución del fenómeno de bombeo**

Es claro para todos que la socavación de borde, presentada en el material de soporte de las losas rígidas, puede llevar a colapsar la estructura ante la sollicitación de cargas.

El suelo-cemento es un material con baja permeabilidad que impide el ingreso del agua y disgregación por tal efecto. Como lo expuesto anteriormente, el suelo -cemento tiene un comportamiento satisfactorio ante la presencia de agua, característica que le permite mantenerse estable e impedir que ante las cargas de borde, el material sea bombeado a la superficie.

➤ **Mejor distribución de carga**

Las capas estabilizadas con cemento funcionan similares a las losas, teniendo en cuenta que su resistencia es menor. Esto permite mayor estabilidad ante la carga transmitida por la losa y genera una respuesta más uniforme y unas presiones menores que con la utilización de materiales granulares. (Ver Fig. 2.2)

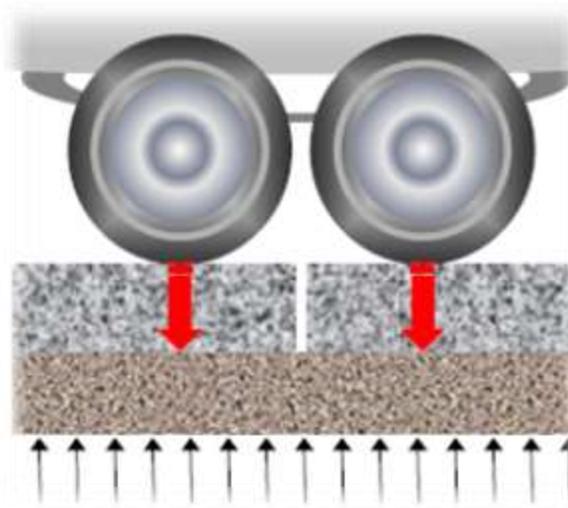


Figura 2.2 Distribución Uniforme de Presiones

Por esta razón los esfuerzos diferenciales se reducen permitiendo que el sistema de esfuerzos en el interior de la losa tenga una distribución más uniforme. El mejor desempeño estructural de la capa estabilizada con cemento se traduce, en el proceso de diseño, en un menor requerimiento estructural, lo que reduce apreciablemente los espesores de la capa de rodadura.

➤ **Mejora la Plataforma de trabajo**

Los pavimentos rígidos dependen en gran medida del buen trato que se le dé a la capa de soporte.

Por su parte una capa estabilizada con cemento debe ser lisa, densa y libre de huellas (planos de compactación).

Ventajas de la utilización de capas estabilizadas en pavimentos flexibles.

➤ **Aumento en la vida útil y reducción del agrietamiento por fatiga**

Al ser la capa estabilizada un material con mejor comportamiento a la fatiga, se puede predecir con más exactitud su desempeño en el tiempo resultando en una mayor vida útil y mejor desempeño estructural.

➤ **Disminución de la presión en la subrasante**

Debido al aporte estructural que proporcionan las capas superiores tratadas con suelo cemento a la subrasante, los esfuerzos se pueden distribuir de una forma más eficiente, de tal manera que involucren áreas mayores, y por consiguiente se disminuyan las presiones en la subrasante.

2.5. DESVENTAJAS DEL USO DEL SUELO CEMENTO

Por otra parte, los inconvenientes más notables que presenta el uso de suelo cemento son:

- Si no es diseñado, dosificado y controlado adecuadamente, puede producir demasiada contracción y agrietamiento que se refleje en las capas de rodadura bituminosa.
- Se debe seleccionar el tipo de cemento adecuado y realizar el número de pruebas necesarias, antes de pretender construir capas de suelo cemento con suelos de mediana plasticidad, ya que el mezclado de suelo y cemento podría resultar muy difícil.
- Las bases de suelo cemento necesitan de capas de rodadura de concreto asfáltico, tratamientos superficiales, o capas de rodadura de concreto hidráulico, ya que tienen una baja resistencia al desgaste no es recomendable utilizarla como capa de rodadura.
- Una vez que se ha introducido el cemento en el suelo y se hace el humedecido, la colocación y compactación de las capas deben hacerse con gran rapidez para evitar el fraguado anticipado y tener resultados poco satisfactorios.
- Es necesario agilizar y realizar un mayor y mejor control de la construcción en obra que el que se hace utilizando los métodos normales.
- Produce mayor agrietamiento en los pavimentos flexibles.
- Es necesario contar con personal especializado.
- Es necesario el realizar cuidados preventivos para el personal por el daño que puede provocar el constante tocar o aspirar el polvo del cemento.

2.6. COMPONENTES DEL SUELO CEMENTO

2.6.1. Suelo

El suelo a ser estabilizado con cemento Pórtland, puede resultar de la combinación de gravas, arenas, limos y arcillas, básicamente cualquier suelo puede estabilizarse con cemento a excepción de los suelos altamente plásticos u orgánicos con altos contenidos de sales o materiales deletéreos que puedan afectar el desempeño del cemento.

Sin embargo, en el estado de la práctica, los suelos que se pueden utilizar se encuentran limitados por:

a) Granulometría adecuada de las partículas.

De acuerdo a diferentes entidades, para que un suelo pueda ser endurecido correctamente, mediante la adición de cantidades razonables de cemento, debe tener la granulometría siguiente:

Según el IMCYC el límite superior del tamaño máximo de las partículas sea de una tercera parte del espesor de la capa compactada. En la distribución granulométrica, el límite máximo de partículas finas que pasan la malla No. 200 debe ser cercano al 50 %, con un límite líquido no mayor de 50 % e índice plástico menor de 25 %. O sea que conviene evitar los suelos altamente compresibles y los muy plásticos. La PCA propone que no más del 45 % sea retenido en la malla No. 4 y un tamaño máximo del agregado de 3", y acepta suelos granulares mal graduados. También recomienda que no se utilicen suelos con muchas gravas, que preferiblemente contengan menos del 15 % de arcillas, que la suma de arcillas y limos varíe entre 20 y 45 % y que contenga arena, preferiblemente entre el 55 y 80 %.

Por otra parte, la PCA considera que no resultan adecuados suelos cohesivos cuyo límite líquido es mayor de 45 % y su límite plástico mayor de 20%.

La AASHTO da las recomendaciones que se presentan en la Tabla 2.3 y en la Tabla 2.4. Por su parte, la ASTM da una serie de recomendaciones que se recopilan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.3 Graduaciones recomendables para tratamientos de suelos arenos-arcillosos

| MATERIAL | CONDICIONES DE LLUVIA EN LA ZONA | | |
|------------------------------|----------------------------------|------------|----------|
| | Fuerte 1 | Moderada 2 | Escasa 3 |
| PORCIONES DE ARENA: | | | |
| Pasa la malla No. 10 | 100 | 100 | 100 |
| Pasa la malla No. 40 | 40-80 | 40-80 | 40-80 |
| Pasa la malla No. 60 | 30-70 | 40-55 | 55-70 |
| Pasa la malla No. 270 | 10-40 | 20-35 | 30-50 |
| PORCIONES DE LIMO: | | | |
| Finos de 0.05 a 0.005 mm | 3-20 | 0-15 | 10-20 |
| PORCIONES DE ARCILLA: | | | |
| Finos menores de 0.005 mm | 7-20 | 9-18 | 15-25 |

Fuente: AASTHO

Tabla 2.4 Clasificación de la AASTHO preparada para el diseño de suelo-cemento

| ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO | GRUPOS DE SUELOS GRANULARES (35 % ó menos pasa la malla # 200) | | | | | | |
|--|--|---------|---------|--------------------|--------|---------|--------|
| | A-1 | | A-3 | A-2 | | | |
| % que pasa la: | A-1-a | A-1-b | | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 | A-2-7. |
| Malla #10 | 50 max | | | | | | |
| Malla # 40 | 30 max | 50 max | 51 max | | | | |
| Malla # 200 | 15 max | 25 max | 10 max | 35 max | 35 max | 35 max | |
| CARACTERÍSTICAS DE LA FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA No. 200 | | | | | | | |
| Límite líquido | | | 40 max | 41 min. | 40 max | 41 min. | |
| índice de plasticidad | 6 max | | N.P, | 10 max | 10 max | 11 min. | |
| ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO | | | | | | | |
| GRUPOS DE SUELOS LIMO-ARCILLOSOS (Más del 35 % se retienen en la malla # 200). | | | | | | | |
| % que pasa la: | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 A-7-5 V A-7-6. | | | |
| Malla # 200 | 36min | 36min | 36 min. | 36 min. | | | |
| CARACTERÍSTICAS DE LA FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA No. 200: | | | | | | | |
| Límite líquido | 40max | 41 min. | 40 max | 41 min. | | | |
| índice de plasticidad | 10max | 10 max | 11 min. | 11 min. | | | |

Fuente: AASTHO M 145

Tabla 2.5 Especificaciones para los agregados de las bases o las subbases

| TAMAÑO DE LA MALLA | PORCENTAJES QUE PASAN | |
|---|-----------------------|----------|
| | BASES | SUBBASES |
| 2' (50 mm) | 100 | 100 |
| 1- 1/2' (37.5 mm) | 95-100 | 90-100 |
| 3/4'(19mm) | 70-92 | - |
| 3/8" (9.5 mm) | 50-70 | - |
| No. 4 (4.75 mm } | 35-55 | 30-60 |
| No. 30 | 12-25 | - |
| No. 200 | 0-8 | 0-12 |
| REQUERIMIENTOS ADICIONALES: | | |
| 1.- Al menos el 75 % de las partículas retenidas en la malla de 3/8" deben tener dos caras fracturadas. | | |
| 2.- La cantidad de material que pasa la malla No. 200 no debe ser mayor que el 60 % de la que pasa por la No. 30. | | |
| 3.- La fracción que pasa la malla No. 40 debe tener máximo w = 25 % máximo I.P.= 4% | | |

b) Consideraciones constructivas.

Se deben tomar en cuenta, entre otros factores:

- ✓ La facilidad para realizar el mezclado del suelo con el cemento y el agua. Los suelos con muchos finos pueden ser poco trabajables.
- ✓ La facilidad para hacer la compactación.
- ✓ El adecuado contenido natural de agua del Suelo en el banco y en la obra para su tratamiento.
- ✓ Evitar tratamientos costosos de los materiales de los bancos.

c) Condiciones ambientales.

Es necesario tomar en cuenta el efecto de la temperatura durante el fraguado porque su efecto es significativo en climas cálidos. Se hace necesario, para otros tipos de climas diferentes al de nuestro país, considerar en los suelos posibles a utilizar, su facilidad para formar mezclas que se adapten a las condiciones ambientales, sobre todo en donde sucede la congelación. Partículas intemperizadas o inapropiadas deben desecharse.

d) Requerimientos de diseño.

Prever la posibilidad de que se alcancen las características deseadas una vez realizado el mezclado.

e) Consideraciones sobre los requerimientos del suelo-cemento terminado.

Suelos con contenidos apreciables de finos plásticos pueden presentar agrietamientos indeseables.

f) Desventajas con respecto a otros tipos de estabilización.

En algunos casos, otros tratamientos pueden ser más ventajosos, ya que cada uno tiene su campo de aplicación donde resultan ser los más adecuados. Por ejemplo, en muchos casos la utilización de cal en vez de cemento puede ser la más apropiada cuando existen suelos con mucho contenido de finos plásticos.

g) Consideraciones de costo.

Los suelos con contenidos apreciables de finos requieren mayor contenido de cemento y por lo tanto los costos son mayores.

h) Tipos de suelos.

De acuerdo al IMCYC los suelos para la estabilización con suelo-cemento pueden considerarse en los grupos siguientes:

- ✓ Granulares limpios.
- ✓ Granulares con cantidades apreciables de finos.
- ✓ Mezclas de finos y granulares.
- ✓ Suelos predominantemente arcillosos.
- ✓ Suelos predominantemente limosos.

Los tres primeros son los que más comúnmente se utilizan para suelo-cemento y los dos últimos se procuran desechar. Incluso en alguna literatura relacionada con el tema se considera a los dos últimos como materiales no aptos para hacer suelo cemento.

En conclusión podemos decir que, el objetivo de limitar el tipo de suelo y los requerimientos granulométricos es para obtener una mezcla económica y de buen comportamiento estructural en términos de la cantidad de cemento.

Hay que tener presente, que los suelos estabilizados con cemento no deben considerarse como materiales inertes. La adición de agua y cemento en el suelo, hará que reaccione químicamente, presentándose cambios a través del tiempo y modificando sus propiedades físicas a corto, mediano y largo plazo.

Otra de las consideraciones que deben tomarse en cuenta para la selección del suelo a utilizar en mezclas de suelo cemento, es el aspecto constructivo y de cumplimiento de los requerimientos estructurales y de diseño de mezcla, ya que algunos suelos presentan mayor facilidad de mezclado y compactación que otros, tendiendo a generar excelentes resultados referente a los parámetros de resistencia mecánica a cumplir.

2.6.2. Cemento

Es un material finamente pulverizado que no es en sí mismo conglomerante, sino que desarrolla esta propiedad como resultado de la hidratación cuando se efectúan las reacciones químicas entre los minerales del cemento y el agua. Se clasifica como

cemento hidráulico cuando los productos de la hidratación son estables en un medio acuoso. El cemento hidráulico comúnmente más usado para hacer suelo-cemento es el Pórtland, que está compuesto por silicatos de calcio hidráulicos, los que se forman con la hidratación del cemento Pórtland y son los responsables de sus características adherentes.

Las propiedades del cemento dependen de su composición química, el grado de hidratación, la finura de las partículas, la velocidad de fraguado, el calor de hidratación y la resistencia mecánica que es capaz de desarrollar.

El tipo de cemento a utilizar para estabilizar un suelo dependerá de las características propias del suelo y del proyecto. Así de esta forma los tipos de cementos a utilizar deberán regirse por las normas respectivas según ASTM o AASHTO.

Las distintas normas para los distintos tipos de cementos son las siguientes:

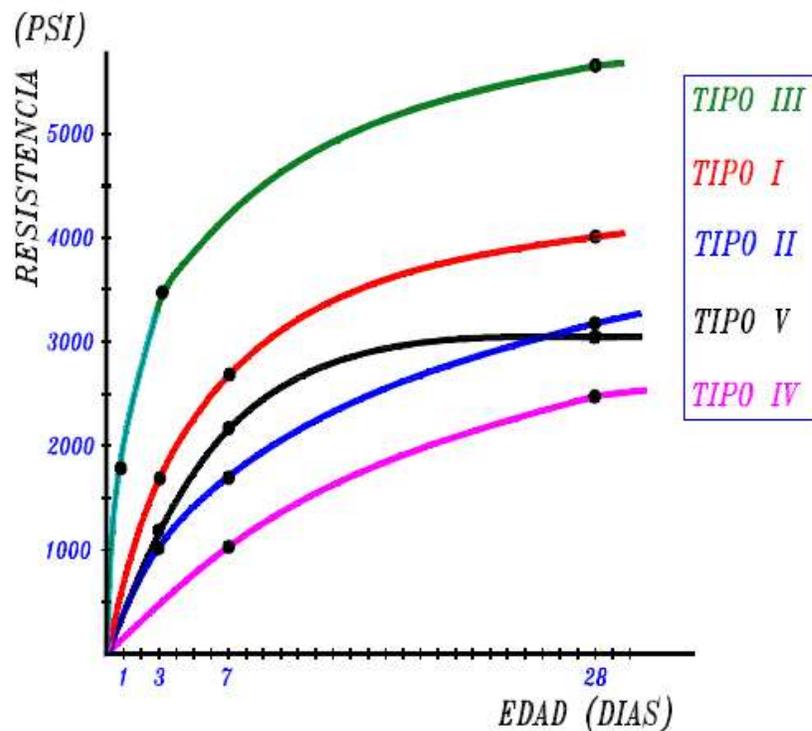
- | | |
|--|-------------|
| • Cemento Pórtland sin adiciones | ASTM C 150 |
| • Cemento Pórtland con adiciones hidráulicamente activas | ASTM C 595 |
| • Cemento Siderúrgico | ----- |
| • Cemento Puzolánico | ASTM C 1157 |
| • Cemento Aluminoso | ----- |
| • Cemento de Mampostería | ASTM C 91 |
| • Cemento Blanco | ASTM C 150 |

Los tipos de cemento Pórtland son:

- **Tipo I:** Conocido como cemento Portland ordinario, que es el de mayor utilización en el mercado. Se lo utiliza en hormigones normales que no estarán expuestos a sulfatos en el ambiente, en el suelo o en el agua del subsuelo.
- **Tipo II:** Cementos con propiedades modificadas para cumplir propósitos especiales, como cementos antibacteriales que pueden usarse en piscinas; cementos hidrófobos que se deterioran muy poco en contacto con sustancias agresivas líquidas; cementos de albañilería que se los emplea en la colocación

de mampostería; cementos impermeabilizantes que se los utiliza en elementos estructurales en que se desea evitar las filtraciones de agua u otros fluidos, etc.

- **Tipo III:** Cementos de fraguado rápido, que suelen utilizarse en obras de hormigón que están en contacto con flujos de agua durante su construcción o en obras que pueden inestabilizarse rápidamente durante la construcción.
- **Tipo IV:** Cementos de fraguado lento, que producen poco calor de hidratación. Se los emplea en obras que contienen grandes volúmenes continuos de hormigón como las presas, permitiendo controlar el calor emitido durante el proceso de fraguado.
- **Tipo V:** Cementos resistentes a los sulfatos que pueden estar presentes en los agregados del hormigón o en el propio medio ambiente. La presencia de sulfatos junto con otros tipos de cementos provoca la desintegración progresiva del hormigón y la destrucción de la estructura interna del material compuesto.



***Figura 2.3 Comportamiento de la Resistencia a Compresión del Cemento tipo
ACTM-150***

Cementos Portland con adición de puzolanas

Los cementos con adición de puzolanas (roca vulcanizada en polvo) presentan particularidades distintas con respecto al cemento Portland tradicional, se recomienda para diferentes aplicaciones. El bajo calor de hidratación de estos cementos implica menor utilización de agua para curado.

Sus hormigones presentan una excelente resistencia al ataque químico por aguas con acidez mineral, sin embargo, si se desea una mayor protección de las armaduras contra la corrosión metálica deberá emplearse preferentemente cemento Portland.

Si bien sus resistencias a la compresión temprana suelen presentarse ligeramente inferiores al cemento Portland puro, después de los 90 días esta diferencia se anula o minimiza a causa de que los silicatos activados de la puzolana reaccionan con el hidróxido de calcio que resulta un subproducto de la hidratación de uno de los componentes del clinker (alita) y de la cal libre presente. Dentro de este tipo de cementos se produce en el mercado nacional los siguientes:

IP-30, IP-40

Dónde I: Hace referencia al Tipo I de cemento; P: Referente a la adición de Puzolana; 30-40 Resistencia a compresión a los 28 días.

Requerimientos de cemento para uso en suelo-cemento

Los requerimientos del cemento varían en función de las propiedades deseadas en la mezcla y del tipo de suelo a utilizar, en cambio, el contenido de cemento a emplear depende si el suelo va a ser modificado o estabilizado.

El ACI 230.1R sugiere para la mayoría de casos el cemento Tipo I ó Tipo II de ASTM C150. En principio, cualquier cemento puede utilizarse en la estabilización de suelos siempre y cuando se analice previamente en un diseño de mezcla, deberá tenerse especial cuidado con suelos ricos en sulfatos, diversos estudios muestran que

contenidos de sulfatos mayores de 0.2% inciden en una reducción de la resistencia a compresión. Los cementos Tipo II y V de ASTM C150 han resistido favorablemente ataque de sulfatos en mezclas de suelo cemento.

La Tabla 2.6 muestra contenidos iniciales de cementos exigidos por varias entidades.

Tabla 2.6 Contenido Inicial de Cemento de Acuerdo a la Clasificación del Suelo

| Contenido de Cemento Inicial, % en peso. | El Salvador | Método PCA | USACE (U.S. Army Corps of Engineers) | COLOMBIA INVIAS. | España |
|--|--|------------------------|---|--|---|
| 5 | No se exige un contenido de cemento inicial. La práctica común considera un 2% como contenido inicial para todos los tipos de suelo. | GW, GP, GM, SW, SP, SM | GW, SW | No sugiere un contenido de cemento inicial | Considera 3% como contenido inicial, para todos los tipos de suelo. |
| 6 | | GM, GP, SM, SP | GP, SW-SM, SW-SC, GW-GM, GW-GC | | |
| 7 | | GM, GC, SM, SC | GM, SM, GC, SC, SP-SM, SP-SC, GP-GC, SM-SC, GM-GC | | |
| 9 | | SP | -- | | |
| 10 | | CL, ML, MH, CH | SP, CL, ML, ML-CL, CH | | |
| 11 | | -- | MH-OH | | |
| 12 | | CL, CH | -- | | |
| 13 | | MH, CH | -- | | |

Finalmente podemos decir que las propiedades del suelo-cemento dependen de la calidad y cantidad de sus constituyentes y de la energía de compactación que se le

aplica. Por lo que la selección correcta del tipo de cemento es importante tanto para la parte económica como para las propiedades mecánicas.

2.6.3. Agua

El agua es esencial en las reacciones que nos permiten obtener los beneficios constructivos del cemento Pórtland. Actúa directamente sobre los elementos principales que lo componen, desencadenando el comienzo de una serie de reacciones químicas que tiene como resultado final el endurecimiento de la mezcla y el mejoramiento de las propiedades mecánicas del conjunto así como también el agua es determinante para lograr el grado de compactación requerido.

El agua tiene como funciones principales:

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

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

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

Cuando en lugar de agua natural se utiliza lechada de cemento para elaborar los especímenes en las pruebas de compactación, la humedad óptima obtenida difiere de la que se obtiene utilizando solo agua, en más o en menos.

Registros de diversas fuentes sugieren que durante la construcción el cemento se hidrate completamente hasta después de 43 días en suelos plásticos y en unos 28 días en suelos granulares.

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

En general, la mayoría de especificaciones y literatura técnica relacionada con los requisitos que debe tener el agua a utilizarse en mezclas de suelo cemento, se limitan a

indicar que ésta debe ser potable o relativamente limpia libre de álcalis, ácidos o materia orgánica. En algunas especificaciones, como en el caso de Colombia y España, sugieren que el agua para elaborar mezclas de suelo cemento, deberá tener un PH entre 5.5 y 8.0 y el contenido de sulfatos no podrá ser superior a 1 gramo por litro.

Adicional a los requisitos de calidad del agua, están los requisitos de cantidad del agua, ya que se deberá lograr la máxima densidad en las mezclas e hidratar adecuadamente el cemento. Por lo general el contenido de humedad deberá estar entre 10 a 13% en peso seco de la mezcla, pero este deberá de ser determinado en la etapa de diseño de la mezcla.

2.6.4. Aditivos

Aditivos químicos, escasamente han sido utilizado en mezclas de suelo cemento, existen más registros de investigaciones en laboratorio que experiencias masivas en campo, varios fabricantes ofrecen aditivos específicamente para suelo cemento, como por ejemplo, Agentes para favorecer la liga o adherencia entre capas de suelo cemento, a base de lignosulfato de calcio y ácido carboxílico hidroxilatado, o Agentes endurecedores y selladores de superficie a base de sales de sodio y silicatos de sodio, existen otros tipos de aditivos químicos menos utilizados como aditivos higroscópicos y reductores de agua.

Este tipo de adiciones puede incrementar la resistencia inicial de la mezclas, optimizar la cantidad de cemento y mejorar en algunos casos, la trabajabilidad de las mezclas.

2.7. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO CEMENTO

El suelo estabilizado con cemento adquiere propiedades que son especialmente adecuadas para la construcción de capas en la estructura de una vía.

Las propiedades del suelo-cemento, varían de acuerdo a diversos factores, los más importantes son:

- a) La naturaleza del suelo, proporción de cemento, cantidad y calidad de agua, y de la cantidad de estos elementos por unidad de volumen de la mezcla compactada.
- b) Las condiciones de mezclado, compactado, curado y acabado que se presentan durante el periodo de hidratación del cemento.

Las Propiedades Mecánicas del Suelo Cemento son las siguientes:

➤ **Resistencia a La Compresión Simple**

Esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento. La resistencia a la compresión de un material que falla debido a la rotura de una fractura se puede definir, en límites bastante ajustados, como una propiedad independiente. Sin embargo, la resistencia a la compresión de los materiales que no se rompen en la compresión se define como la cantidad de esfuerzo necesario para deformar el material una cantidad arbitraria. La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima por el área transversal original de una probeta en un ensayo de compresión.

La resistencia a compresión simple en mezclas de suelo cemento, es un indicador del grado de reacción del suelo - cemento – agua y la relación de endurecimiento respecto al tiempo. Los valores obtenidos dependen de muchos factores entre ellos están:

- El contenido y tipo de cemento
- Tipo de suelo.
- La energía de compactación aplicada.
- La eficiencia lograda en el mezclado.
- El tipo y cantidad de materia orgánica, sales y materiales deletéreos existentes en el suelo.
- Cantidad y calidad del agua.
- El tiempo transcurrido después de realizado el mezclado y compactación.
- La duración y forma de hacer el curado.
- Las medidas consideradas para disminuir el agrietamiento.
- Las características y efectividad de los aditivos o adiciones utilizadas.
- Tamaño y forma del espécimen de ensayo.

De acuerdo con ACI 230.1R, los rangos típicos de resistencia a compresión simple de 7 a 28 días de edad (saturados previamente al ensayo) varían de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Resistencia a Compresión Simple de 7 a 28 Días

| Tipo de Suelo. SUCS | F'c a 7 días (psi) | F'c a 28 días (psi) |
|---------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| GW, GC, GP, GM, SW, SC, SP, SM. | 300 – 600 | 400 – 1000 |
| ML, CL | 250 – 500 | 300 – 900 |
| MH, CH | 200 – 400. | 250 – 600. |

Fuente: ACI 230.1R

En el caso de estructuras de pavimentos, existen valores de resistencia a compresión simple sugeridos de acuerdo al tipo de pavimento y tipo de capa a construir en la estructura, tal como se muestra en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Resistencia mínima a Compresión Simple para suelos estabilizados con cemento, cal y cal-cemento y cenizas volcánicas

| Capa de suelo estabilizado | Resistencia mínima de compresión, psi* | | |
|----------------------------|--|----------------------------|--------------------------------------|
| | Pavimento flexible | | Pavimento rígido, todas las agencias |
| | Ejercito y Fuerza Aérea (EUA) | Marina (EUA) | |
| Base | 750 | 750 | 500 |
| Subbase | 250 | 300 (cemento) 150 (cal) | 200 |

*Resistencia a compresión determinada a 7 días para estabilización con cemento y a 28 días para cal y cal-cemento y cenizas volantes¹¹

Requerimientos Mínimos Para La Evaluación De La Resistencia A La Compresión Simple Exigidas En Varios Países. Se muestran en las siguientes tablas (Curado Húmedo).

El Salvador:

Tabla 2.9 Resistencia mínima a compresión “El Salvador”

| Tipo de suelo | Resistencia mínima a la compresión simple, psi | |
|-----------------|--|---------|
| | 7 días | 28 días |
| Todos los tipos | 284 | - |

PCA (EUA):

Tabla 2.10 Resistencia mínima a compresión “PCA (EUA)”

| Tipo de suelo | Resistencia mínima a la compresión simple, psi. | |
|--------------------------|---|----------|
| | 7 días | 28 días |
| Suelos arenosos y gravas | 300-600 | 400-1000 |
| Suelos limosos | 250-500 | 300-900 |
| Suelos arcillosos | 200-400 | 250-600 |

INVIAS (Colombia):

Tabla 2.11 Resistencia mínima a compresión “INVIAS (Colombia)”

| |
|---|
| Bases estabilizadas: Resistencia a 7 días = 21 kg/cm ² (300 psi) |
|---|

ESPAÑA:

Tabla 2.12 Resistencia mínima a compresión “ESPAÑA”

| Tipo de suelo | Resistencia mínima a la compresión simple, psi | |
|-----------------|--|---------|
| | 7 días | 28 días |
| Todos los tipos | 213 | - |

Es importante mencionar, que la resistencia a compresión simple aumenta con el tiempo, todos los experimentos y mediciones realizadas demuestran que existe un apreciable aumento de resistencia con el tiempo. La resistencia a compresión simple, aumenta considerablemente en los primeros 90 días, de una a tres veces más que a los 7 días, según el tipo de suelo, tipo y contenido de cemento, edades posteriores a 28 días han demostrado un crecimiento mucho más lento.

➤ **Resistencia a la flexión**

El comportamiento del suelo cemento respecto a su resistencia a la flexión, se ha conocido directa e indirectamente a través de diversos ensayos, como por ejemplo elaboración y ensayo de vigas según ASTM D1635 y ensayos de tensión indirecta. En general se distinguen dos grupos o conjuntos de valores, los correspondientes a los suelos finos, y los obtenidos a través de mezclas con suelos granulares, se ha observado que el módulo de ruptura (MR) varía directamente con la resistencia a la compresión simple y con el peso volumétrico seco máximo de la mezcla, ACI 230.1R sugiere la siguiente ecuación como una “buena aproximación” entre la resistencia a compresión y el módulo de ruptura:

$$MR = 0.51 (F'c)^{0.88}$$

Dónde:

MR = Modulo de ruptura en psi.

F_c = Resistencia a la compresión simple en psi.

Diversos autores coinciden que el módulo de ruptura, puede variar de 1/3 a 1/5 de la resistencia a compresión del suelo cemento, esto proporciona una idea de la rigidez y la conveniente capacidad de distribución de cargas, que pueden generarse en estructuras de pavimentos utilizando este tipo de mezclas. En lo referente a la evolución de la resistencia a la flexión con la edad, se puede afirmar, que su crecimiento es mínimo, de acuerdo con Rieuwerts De Vries el módulo de ruptura a los 28 días es de 1.1 a 2 veces más al que se obtiene a 7 días, y a los 90 días es de 1.5 a 2.7 veces más al de los 7 días. Un rango típico de valores de módulo de ruptura a 28 días es de 6 a 17 Kg/cm².

➤ **Módulo de elasticidad**

Relación entre la fatiga unitaria y la correspondiente deformación unitaria en un material sometido a un esfuerzo que está por debajo del límite de elasticidad del material. Además es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. También llamado coeficiente de elasticidad, módulo de Young, módulo elástico.

Para un material elástico lineal e isótropo, el módulo de Young tiene el mismo valor para una tracción que para una compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico, y es siempre mayor que cero.

En el diseño estructural de pavimentos, es muy importante que cada una de las capas que forman la estructura, tengan la capacidad de distribuir las cargas impuestas por el tráfico vehicular generando la menor deformación posible. Esto se logra teniendo altos módulos de elasticidad en una o dos capas de la estructura de pavimento, el tratamiento de suelos con cemento eleva considerablemente los módulos de elasticidad, generando

una rigidez tal, que puede ser aprovechada en beneficio de una conveniente distribución de carga y buen desempeño de la estructura del pavimento durante la vida de diseño.

Los parámetros de módulos de elasticidad estáticos, dinámicos y relaciones de poisson son muy variables, dependen principalmente del tipo de suelo y contenido de cemento en la mezcla. En general estos valores de módulos, son bajos comparados con valores de concreto y muy altos si son comparados con el suelo natural compactado. Según el ISCYC, valores típicos a 28 días de módulo de elasticidad estáticos en mezclas de suelo cemento elaboradas con suelos granulares varían de 40.000 Kg/cm² a 71.000 Kg/cm², En las figuras de la 2.4 (a y b) a la 2.5 (a y b) se muestra la obtención de módulos de elasticidad estáticos y dinámicos en laboratorio.

La PCA y AASHTO sugieren valores entre 35.000 Kg/cm² y 148.000 Kg/cm² a 28 días para la mayoría de mezclas.

La realización periódica de ensayos de módulos de elasticidad dinámicos o estáticos, no es una práctica común en los trabajos de diseño y construcción de capas de suelo cemento en la mayoría de países, por lo general se han realizado este tipo de ensayos desde el punto de vista investigativo, sin embargo, es muy importante que en cada país se tengan registros locales de este parámetro, con la finalidad de no estimar u obtener por correlaciones dichos valores, siendo esta una práctica común cuando se realizan cálculos de diseño estructural de pavimentos.



Figura 2.4 (a) y (b) Frecuencia Resonante para la determinación de módulos de elasticidad en muestras inalteradas de Suelo Cemento

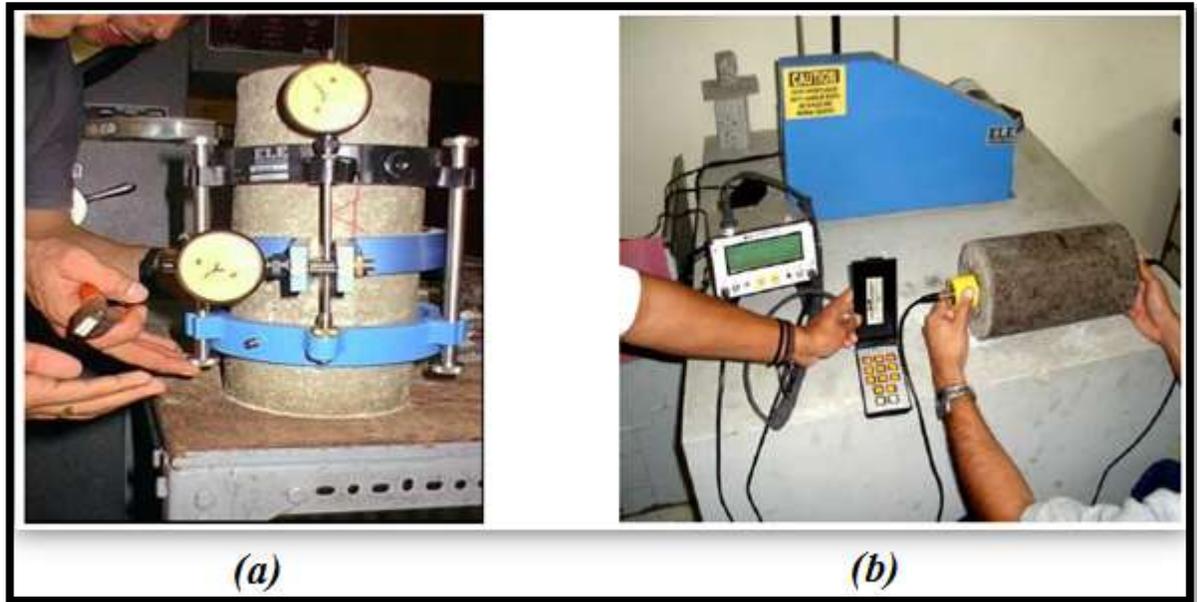


Figura 2.5 (a) Determinación de Módulos de Elasticidad Estáticos. (b) Pulso Ultrasónico para la determinación de Módulos Dinámicos

➤ **Resistencia al desgaste**

Esta propiedad no es evaluada en el suelo cemento cuando se utiliza en estructuras de pavimentos, ya que tal como lo ha demostrado la experiencia y diversas investigaciones, el suelo cemento es excelente para soportar esfuerzos perpendiculares a la superficie, pero muy deficiente para soportar fuerzas abrasivas del tránsito circulando directamente sobre él. Por tal razón, en este tipo de aplicaciones, se recurre a proteger las capas de suelo cemento colocando sobre ella una capa de rodadura de concreto hidráulico, concreto asfáltico, o tratamientos superficiales asfálticos.

La resistencia al desgaste dependerá principalmente del contenido de cemento, del contenido de finos y de la calidad de la construcción. Se ha observado que:

- Cuando se usa superficialmente en carreteras se desgasta rápidamente bajo la acción abrasiva del tránsito, por lo que es recomendable proteger las capas de suelo-cemento colocando encima de ella una capa de concreto asfáltico.

- El suelo-cemento es bastante resistente a la acción erosiva de las lluvias.
- Para su uso en muros y pisos de casas la resistencia al desgaste es bastante buena.
- Para su uso en obras de protección contra la erosión de las corrientes y los oleajes del mar y embalses se considera que su resistencia es muy buena.
- Es bastante resistente para resistir la socavación concentrada de corrientes fluviales.

➤ **Capacidad de Soporte CBR (valor de soporte california)**

El Ensayo CBR (California Bearing Ratio: Ensayo de Relación de Soporte de California) mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo y para poder evaluar la calidad del terreno para subrasante, sub base y base de pavimentos. Se efectúa bajo condiciones controladas de humedad y densidad. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte, que no es constante para un suelo dado sino que se aplica solo al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo.

El índice de soporte California C.B.R. (California Bearing Ratio), es una medida de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, cuyas condiciones de densidad y humedad son controladas con cuidado. El CBR es la relación que se da entre el esfuerzo requerido para introducir un pistón estandarizado y patronado en la muestra de suelo a ensayar que está dentro de un molde y el esfuerzo requerido para inyectar el pistón hasta una profundidad en una muestra de piedra triturada que figura como patrón y el CBR se expresa en porcentaje.

$$\text{CBR} = \frac{\text{CARGA EN EL SUELO ENSAYADO}}{\text{CARGA EN LA MUESTRA PATRON}} \times 100$$

El CBR puede variar con su humedad al momento de compactar, con su densidad y también al momento de ensayarse. Lo que se busca es reproducir las condiciones de campo o de la obra en el laboratorio al momento de ensayarse lo cual implica tener un control cuidadoso de todos estos factores.

En la mayoría de ocasiones se trata de representar la condición más crítica que pueda llegar a presentar un suelo en el campo, por tal motivo se lleva al suelo a la saturación antes de ser falladas, también se pueden hacer ensayos con muestras inalteradas traídas de campo.

Los intentos para ligar el proporcionamiento de las mezclas con el valor relativo de soporte no han llevado a resultados concluyentes porque es usual que cualquier suelo-cemento, y sobre todo los que contienen suelos granulares gruesos, alcancen sistemáticamente valores tan altos del C.B.R. que su interpretación sea poco confiable.

Valores del C.B.R, y otras propiedades exigidas para distintas capas de suelo-cemento se presentan en la tabla 2.13.

Tabla 2.13 Propiedades comúnmente exigidas a las mezclas de suelo-cemento

| TIPO DE CAPA | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE A 7 DIAS (kg/cm ²) | C.B.R. % | EXPANSION ⁽¹⁾ % | PERDIDAS DE PESO EN P. HUMED. Y SEC. ⁽²⁾ % |
|---|---|----------|----------------------------|---|
| Sub-bases. Material de relleno para trincheras. | 3.5-10.5 | 20-80 | 27 | |
| Sub-bases o bases para tránsito muy ligero. | 7.0 - 14.0 | 50-150 | 2 | 10 |
| Bases para tráfico intenso. | 14.0 - 56.0 | 200-600 | 2 | 14 |
| Protecciones de terraplenes contra erosión V acción del agua | 56 | 600 | 2 | 14 |
| 1) Después de siete días de curado a humedad constante. La resistencia de especímenes análogos sumergidos en agua no debe ser más o menos de un 20 %. | | | | |
| 2) Después de un periodo de inmersión en agua de cuatro días. | | | | |

Fuente: IMCYC, Suelo Cemento Usos y Propiedades.

➤ Módulo de Reacción

Es la presión que ha de transmitirse a la superficie para producir al suelo una deformación.

El módulo de reacción se obtiene generalmente mediante la prueba de placa de carga (Figura 2.6) aunque puede ser determinado por otros métodos como el deflectómetro de impacto o FWD (Falling Weight Deflectometer) o por correlaciones con el CBR



Figura 2.6 Equipo utilizado en la realización de prueba de placa de carga

➤ **Fatiga**

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

En la práctica francesa se realizan pruebas de fatiga con deformación controlada y con temperatura y frecuencia de aplicación constantes. La curva resultante de fatiga resultante se linealiza en una gráfica logarítmica o semilogarítmica de deformaciones contra número de repeticiones, llamada Diagrama de Wholer (véase Fig. 2.7), de donde obtienen las fórmulas aproximadas:

$$\text{Log } S = \text{log } S_0 - b \text{ log } N$$

$$N F/F_0 = 1 - a \text{ log } N$$

Dónde:

S: deformación aplicada que provoca la ruptura en N repeticiones de carga.

S₀: deformación para una carga.

N: repeticiones de carga.

F: esfuerzo de ruptura a N repeticiones.

F₀: esfuerzo de ruptura para una carga.

a: coeficiente cercano a 1/12 para suelos estabilizados con cemento.

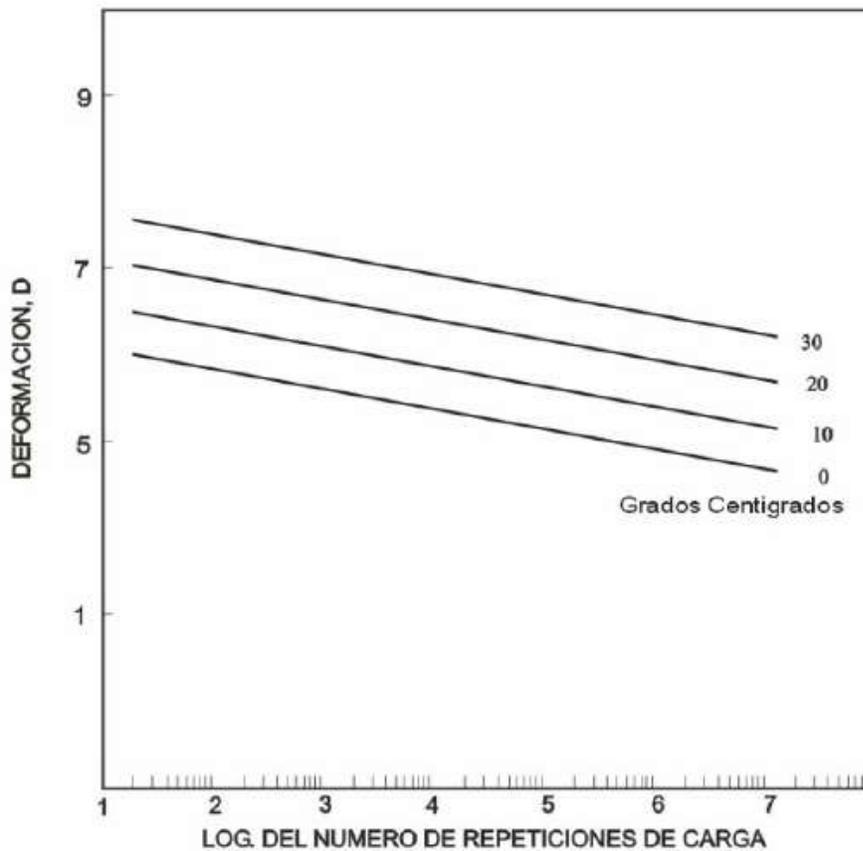


Figura 2.7 Pruebas típicas de fatiga sobre suelo cemento Diagrama de Wholer

Por otra parte, el número de repeticiones de la carga que llega a causar la falla se ha relacionado con el radio de curvatura de la parte de la capa tratada que se flexiona bajo una llanta cargada o bajo una placa de carga. La Portland Cement Association permite

valores para radios críticos de curvatura de 4000 a 7500 pulgadas para pruebas en muestras de dimensiones de 6 x 6 x 30 pulgadas.

➤ Módulo de Poisson

El coeficiente de Poisson, es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento.

Valores obtenidos del módulo Poisson para suelo-cemento se presentan en las tablas 2.14 y 2.15 siguientes:

Tabla 2.14 Módulos de Poisson medios del suelo-cemento

| INVESTIGADORES | VALORES MEDIOS DEL MODULO. |
|---------------------------------------|----------------------------|
| Felt y Abrams | 0.08 - 0.24 |
| Inglés, O.G. | 0.10 - 0.30 |
| Portand Cement Association, E.U.A. | 0.12 - 0.14 |
| Larsen T.J. Nussbaum M. y Collev B.E. | 0.10 - 0.20 |
| Granular con finos | 0.12 |
| Granular. | 0.14 |
| Reinhold, F | 0.13 |

IMCYC, Suelo Cemento Usos y Propiedades.

Tabla 2.15 Módulos de Poisson

| INVESTIGADORES | ESTÁTICO | DINÁMICO | TI PODE SUELO |
|------------------------------------|-------------|-------------|-----------------|
| Felt y Abrams | | 22 - 0.27 | Arenoso |
| | | 0.41 - 0.42 | Areno-arcilloso |
| Reinhold | 0.095-0.125 | | Areno-arcilloso |
| Portland Cement Association.E.U.A. | 0.120-0.142 | | Arenoso |

IMCYC, Suelo Cemento Usos y Propiedades.

➤ Coeficiente Estructural de Capa

El coeficiente de capa o de aporte estructural “a” utilizado en el diseño estructural de pavimentos, el cual según ACI 230.1R, puede alcanzar valores entre 0.18 y 0.23 para mezclas con resistencia a compresión simple entre 24,6 Kg/cm² y 45,77 Kg/cm² respectivamente. Así mismo, existen otros puntos de vista para la determinación del coeficiente de aporte “a”, Según Hodges¹⁴ J.W., Rold J. and Jones T.E. dicho coeficiente puede determinarse en bases estabilizadas con cemento, en función de la resistencia a compresión simple utilizando la siguiente ecuación:

$$a_2 = (750 + 386r - 8.83r^2) 10^{-4}$$

r = resistencia a compresión simple en Mpa

2.8. DISEÑO DE MEZCLAS DE SUELO CEMENTO

2.8.1. Criterios ACI 230

Generalidades.

Los principales requisitos estructurales de una mezcla de suelo-cemento endurecido, están basados en resistencia adecuada y durabilidad. Para aplicaciones de agua tales como en las calzadas, la permeabilidad puede ser el requisito principal. El ACI 230 no tiene una metodología como tal para el diseño de mezclas de suelo-cemento, este hace referencia a diferentes metodologías de otras instituciones como por ejemplo de la PCA.

En la Tabla 2.16 se presentan contenidos de cemento típicos para las aplicaciones en pavimentos. Se dan procedimientos de prueba detallados para evaluar proporciones de mezcla en el Manual de Laboratorio de Suelo-cemento de la Portland Cement Association (PCA) y por las siguientes normas de prueba estándar ASTM:

ASTM D 558

Prueba para Relación de Densidad-Humedad de Mezclas de Suelo-cemento

ASTM D 559

Prueba de humedecimiento y secado de Mezclas de Suelo-cemento compactado

ASTM D 560

Prueba de congelamiento y deshielo de Mezclas de Suelo-cemento compactado

ASTM D 1557

Relación humedad-densidad de suelos (Proctor Modificado).

ASTM D 1632

Hechura y curado de especímenes de suelo – cemento hechos en laboratorio

ASTM D 1633

Ensayo de compresión simple de cilindros de suelo cemento

ASTM D 2901

Prueba para determinación del contenido de cemento en mezclas de suelo cemento fresco.

Tabla 2.16 Requerimientos típicos para varios grupos de suelos

| AASHTO | ASTM (SUCS) | Rango típico de cemento (% en peso) | Contenido típico de cemento para prueba de humedad-densidad (% en peso) | Contenido típico de cemento para pruebas de durabilidad (% en peso) |
|--------|------------------------|-------------------------------------|---|---|
| A-1-a | GW, GP, GM, SW, SP, SM | 3-5 | 5 | 3-5-7 |
| A-1-b | GM, GP, SM, SP | 5-8 | 6 | 4-6-8 |
| A-2 | GM, GC, SM, SC | 5-9 | 7 | 5-7-9 |
| A-3 | SP | 7-11 | 9 | 7-9-11 |
| A-4 | CL, ML | 7-12 | 10 | 8-10-12 |
| A-5 | ML, MH, CH | 8-13 | 10 | 8-10-12 |
| A-6 | CL, CH | 9-15 | 12 | 10-12-14 |
| A-7 | MH, CH | 10-16 | 13 | 11-13-15 |

Fuente: ACI 230.1R

Como se mencionó antes, el ACI hace referencia a diferentes metodologías de proporcionamiento de mezclas de suelo-cemento que considera aceptable, de instituciones como La Pórtland Cement Asociación (PCA), El cuerpo de ingenieros de US (USACE), El criterio de diseño de U.S. Bureau of Reclamation (USBR) y criterios utilizados en el Condado de Pima, Arizona.

- **El criterio de La Pórtland Cement Asociación (PCA)** se resume en la Tabla 2.17 los volúmenes de cemento suficiente para prevenir pérdida de pesos mayores de los valores indicados después de 12 ciclos de humedecimiento-secado-cepillado o congelamiento-deshielo-cepillado son considerados adecuados para producir un suelo cemento durable.

Tabla 2.17 Criterios de la PCA para ensayos de humedecimiento y secado o congelamiento - descongelamiento

| AASHTO | ASTM (SUCS) | Máxima pérdida de peso permisible, % |
|--|------------------------|--------------------------------------|
| A-1-a | GW, GP, GM, SW, SP, SM | 14 |
| A-1-b | GM, GP, SM, SP | 14 |
| A-2 | GM, GC, SM, SC | 14* |
| A-3 | SP | 14 |
| A-4 | CL, ML | 10 |
| A-5 | ML, MH, CH | 10 |
| A-6 | CL, CH | 7 |
| A-7 | MH, CH | 7 |
| <p>*10 por ciento de pérdida máxima permisible de peso para suelos A-2-6 y A-2-7 Criterios adicionales: 1. Cambio máximo de volumen durante la prueba de durabilidad, debe de ser menor de 2% del volumen inicial. 2. El máximo contenido de agua durante la prueba debe ser menor que la cantidad requerida para la saturación de la mezcla en el tiempo del moldeo. 3. La resistencia a la compresión debe incrementar con la edad del espécimen</p> | | |

Fuente: ACI 230.1R

- **El cuerpo de ingenieros de US (USACE)** sigue su manual técnico, “la Estabilización de Suelos para Pavimentos,” TM 5-822-4. La durabilidad y requisitos de resistencia para la estabilización con cemento pórtland se da en

las Tablas 2.18 y 2.19, respectivamente. USACE requiere que ambos criterios sean conocidos antes de que una capa estabilizada sea utilizada para reducir el espesor de la superficie requerida en el diseño de un sistema de pavimentos. USACE frecuentemente aumenta el contenido de cemento considerado entre 1 % y 2 % por las variaciones que se producen en campo.

Tabla 2.18 USACE Requerimientos de Durabilidad

| USACE requerimientos de durabilidad | |
|---|---|
| Tipo de suelo estabilizado * | Perdida de peso máxima permitida después de 12 ciclos de humedecimiento- secado y congelamiento- deshielo, porcentaje del peso inicial del espécimen |
| Granular, IP<10 | 11 |
| Granular, IP>10 | 11 |
| Limo | 11 |
| Arcilla | 6 |
| * Referencia de MIL-STD-619B y MIL-STD-621A. Del Cuerpo de Ingenieros de US | |

Fuente: ACI 230.1R

Tabla 2.19 USACE Criterios de Resistencia a la Compresión Mínima sin confinamiento Lateral

| USACE Criterios de resistencia a la compresión mínimo sin confinamiento lateral | | |
|--|---|-------------------------|
| Capa de suelo estabilizado | Mínima resistencia a la compresión sin confinamiento lateral a los 7 días, psi | |
| | Pavimento flexible | Pavimento rígido |
| Capa de Base | 750 | 500 |
| Capa de subbase, material selecto o subrasante | 250 | 200 |

Fuente: ACI 230.1R

Consideraciones especiales

- Tamaño de especímenes para la determinación de la resistencia a la compresión:

Frecuentemente se realizan pruebas de resistencia a la compresión a especímenes obtenidos de moldes normalmente disponibles en laboratorios de suelos y se usan para otras pruebas de suelo cemento. Estos especímenes de prueba son de 4.0 pulg. (10.16 cm.) de diámetro y 4.584 pulg. (14.18 cm.) de altura con una relación altura/diámetro (h/d) de 1.15. Esto difiere de moldes convencionales para concretos que usan una relación h/d de 2. La relación h/d de 2 proporciona una medida más exacta del esfuerzo a la compresión desde el punto de vista técnico, ya que reduce condiciones de tensión complejas que pueden ocurrir durante el ensayo de especímenes de relación h/d más bajos. En pruebas de suelo-cemento, sin embargo, son usados especímenes con relaciones h/d más bajas (1.15; 0.75, acorde a ASTM D 1633). La mayoría de los valores de resistencia a la compresión proporcionados son basados en la relación h/d = 0.75 Usando el factor de corrección para núcleos de concreto proporcionado por ASTM C 42, (tabla 2.20) una corrección aproximada a valores de esfuerzos a la compresión obtenidos con especímenes con h/d de 2, puede hacerse multiplicando el valor de esfuerzo a la compresión (obtenido con especímenes con relación h/d de 0.75) por un factor de 0.70

Tabla 2.20 Factores de corrección para relaciones h/D menores a 2.0.

| | | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|
| Relación h/D | 1.75 | 1.50 | 1.25 | 1.00 | 0.75 | 0.50 |
| Factor de Corrección | 0.98 | 0.96 | 0.93 | 0.87 | 0.70 | 0.50 |

Fuente: ASTM C 42.

- Suelos arenosos con reacciones pobres

Ocasionalmente, se encuentran ciertos tipos de suelos arenosos que no pueden tratarse con éxito con cantidades normales de cemento portland. Las primeras investigaciones mostraron que el material orgánico de naturaleza acida tenía un efecto adverso en mezclas de suelo cemento. El estudio mostró que ese volumen orgánico y el PH no

constituyen por si mismos una indicación de una arena con reacciones pobres. Sin embargo, el suelo arenoso con un contenido orgánico mayor al 2 por ciento o teniendo un PH menor de 5.3, tiene todas las probabilidades de no tener una reacción normal con cemento. Estos suelos exigen estudios especiales antes de utilizar suelo cemento.

- Resistencia de sulfato

Como con el concreto convencional, los sulfatos atacarán generalmente el suelo cemento. Los estudios de “Cordón y Sherwood” han indicado que la resistencia al ataque del sulfato difiere para suelos tratados con cemento de grano grueso y de grano fino y ha sido una función de la arcilla y concentraciones del sulfato. Los estudios mostraron que esas reacciones del sulfato-arcilla son más perjudiciales que las reacciones del cemento con el sulfato, produciendo un deterioro del suelo cemento de grano fino más rápidamente que con el suelo cemento de grano grueso. Aumentando el contenido de cemento en las mezclas de suelo cemento, puede ser más beneficioso que cambiar a un tipo de cemento resistente al sulfato.

2.8.2. Métodos según PCA

Método detallado de la PCA.

El método de diseño de mezcla de suelo cemento de la PCA está fundamentado en criterios específicamente de durabilidad (pruebas de mojado-secado y de congelamiento descongelamiento con especímenes compactados), y se resume en los siguientes pasos, apoyado por las normas ASTM correspondientes.

- a) Clasificar el suelo y de acuerdo a esto seleccionar varios contenidos de cementos distintos para la preparación de las mezclas iniciales. Tabla 2.16
- b) Realizar pruebas de humedad – densidad para seleccionar la humedad optima de compactación.
- c) Verificar el contenido inicial de cemento de acuerdo con los rangos establecidos en la Tabla 2.16

- d) Preparar especímenes con diversas mezclas para realizar las pruebas de laboratorio pertinentes. Se preparan dos especímenes de cada mezcla con la humedad óptima obtenida en la prueba de compactación.
- e) Someter a uno de los especímenes a la prueba de Mojado-Secado y al otro a la de Congelación –Descongelación, aunque esta última no aplica en El Salvador.
- f) Seleccionar el porcentaje de cemento comparando los resultados obtenidos con los de las pérdidas admisibles. Las pérdidas admisibles determinadas por la PCA se dan más adelante.
- g) Posteriormente, se sujetan las probetas a pruebas de resistencia a la compresión simple y a las pruebas adicionales que fuesen necesarias según lo determinen las necesidades del proyecto. En general, se especifica un mínimo aproximado de 21 kg/cm² a la compresión simple, a los siete días.

Según la Portland Cement Association, de los E.U.A, la dosificación adecuada de cemento es la mínima que cumple las condiciones siguientes:

- Las pérdidas de material desagregado durante los doce ciclos, tanto en ensayos de Congelación-Descongelación y Humedad-Secado no deben ser mayores de:
 - a) 14% para suelos A-1 .a, A-1 .b, A-3, A-2-4, y A-2-5.
 - b) 10 % para suelos A-2-6, A-2-7, A-4 y A-5.
 - c) 7 % para suelos A-6 y A-7.
- El aumento de volumen en las muestras no debe exceder en más del 2% del volumen inicial.
- El máximo contenido de agua no debe ser mayor que el necesario para llenar los huecos del suelo-cemento, una vez terminado de compactar.

El criterio de diseño de la PCA en cuanto a durabilidad se resume en la tabla 2.17 contenido de cemento suficiente para prevenir pérdidas de peso mayores a los valores de la tabla 2.18 después de 12 ciclos de humedecimiento – secado – cepillado son considerados adecuados para producir una mezcla de suelo cemento durable.

Método corto de la PCA.

La PCA en el documento Manual de Laboratorio de Suelo cemento, contempla un método corto para el diseño de mezclas, que se fundamenta en el uso de tablas y gráficos y en un número reducido de ensayos, los cuales consisten únicamente en ensayos granulométricos, relación humedad – densidad máxima y ensayos de resistencia a compresión simple a 7 días.

El método corto no siempre indica el mínimo contenido de cemento con que tratar un suelo, pero casi siempre proporciona un contenido de cemento dentro de la seguridad; que estará cercano al obtenido por el método detallado de la PCA.

Este método es aplicable para suelos predominantemente arenosos que tengan la granulometría siguiente:

- El contenido de finos es inferior al 50%
- El contenido de arcilla inferior al 20%
- El material retenido en la malla N° 4 debe ser menor del 45%
- No existen cantidades apreciables de sustancias orgánicas
- No se aplica margas, cretas, carbones, cenizas, y escoria.

El método corto tiene dos variantes: la variante “A” para materiales que pasan totalmente la malla N° 4, y variante “B” para los que se retienen en la malla N° 4. En todo caso, se deberá obtener el resultado de resistencia a compresión como el promedio de tres especímenes ensayados a 7 días de curado húmedos, previamente saturados por inmersión en agua por cuatro horas.

El procedimiento general es el siguiente:

1. Se determina la granulometría del suelo.
2. Se determina el peso volumétrico del material retenido en la malla N° 4.
3. Si el suelo cumple los requisitos para aplicar el método, entonces se escogerá la variante que proceda.

La variante " A", se desarrolla en los pasos siguientes:

- a. Con los datos del análisis granulométrico y la ayuda de la Fig. 2.8, se estima el máximo peso volumétrico promedio inicial.

- b. Con los datos del peso volumétrico estimado y del porcentaje de material más fino que 0.05 mm (malla No. 270), se acude a la Fig. 2.9 para obtener el contenido de cemento por peso; con el cual se prepararán los especímenes para el ensayo próctor modificado o estándar.
- c. A partir de los resultados obtenidos en la prueba Proctor correspondiente se determina el máximo peso volumétrico seco y el contenido de humedad óptimo.
- d. Con el máximo peso volumétrico seco obtenido anteriormente se escoge otra vez con ayuda de la Fig. 2.9 el contenido de cemento requerido para fabricar los especímenes. La PCA indica que las cartas y procedimientos pueden ser modificados de acuerdo con el clima y condiciones locales.
- e. Se fabrican tres especímenes para el ensayo de resistencia a la compresión simple, con el peso volumétrico y la humedad óptima determinada en la prueba Proctor.
- f. De los resultados de las pruebas realizadas se obtiene la resistencia a la compresión simple promedio, de tres especímenes ensayados que deben tener siete días de curado húmedo y cuatro horas de saturación por inmersión en agua, inmediatamente antes de ser ensayados.
- g. El valor promedio de las compresiones simples obtenidas deberá ser mayor que el que proporciona la Fig. 2.10. Si el valor obtenido es menor entonces se deberá realizar la serie de pruebas completas y si resultado mayor, se considerará que el contenido de cemento es adecuado.
- h. Para efectos de facilidad en la construcción, se convierte el contenido de cemento en peso a contenido de cemento en volumen por medio de la Fig. 2.11.

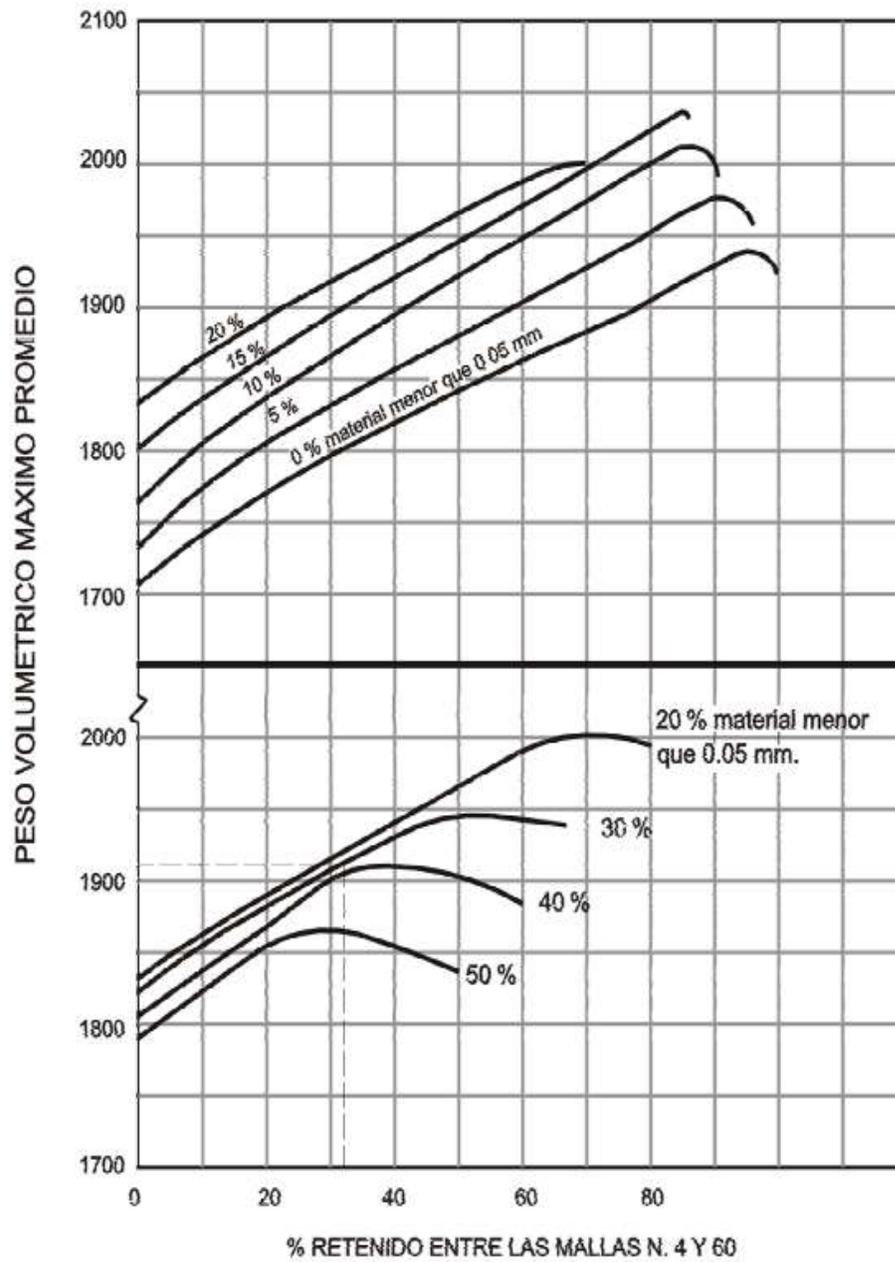


Figura 2.8 Estimación del peso Volumétrico Máximo Promedio. Método corto de la PCA

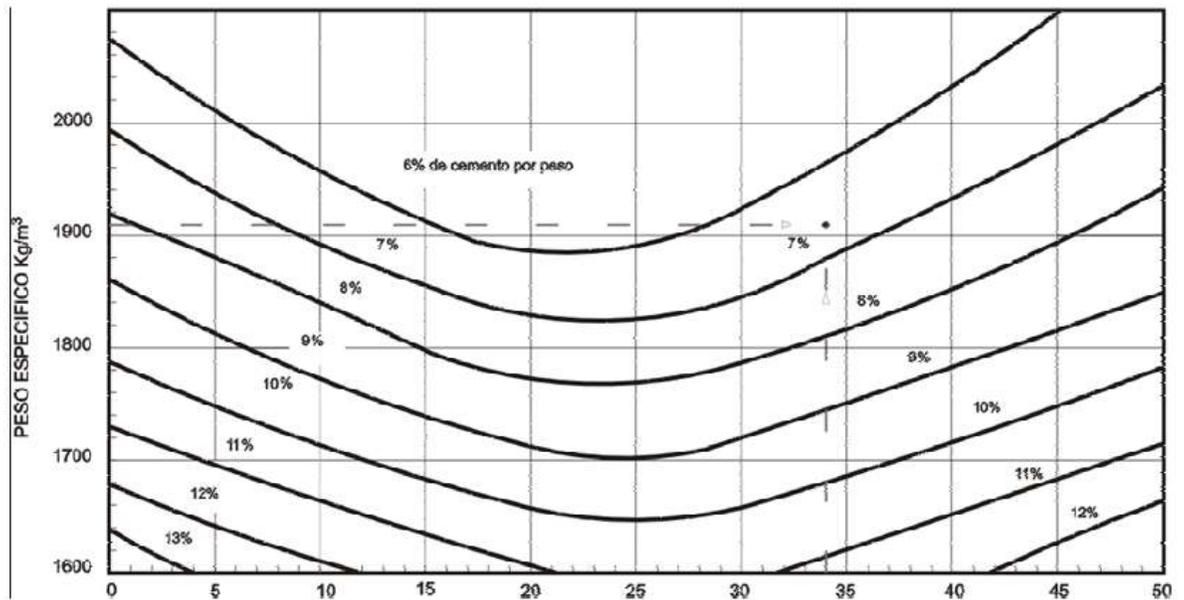


Figura 2.9 Obtención de los contenidos de cementos de suelos que retienen material en malla #4

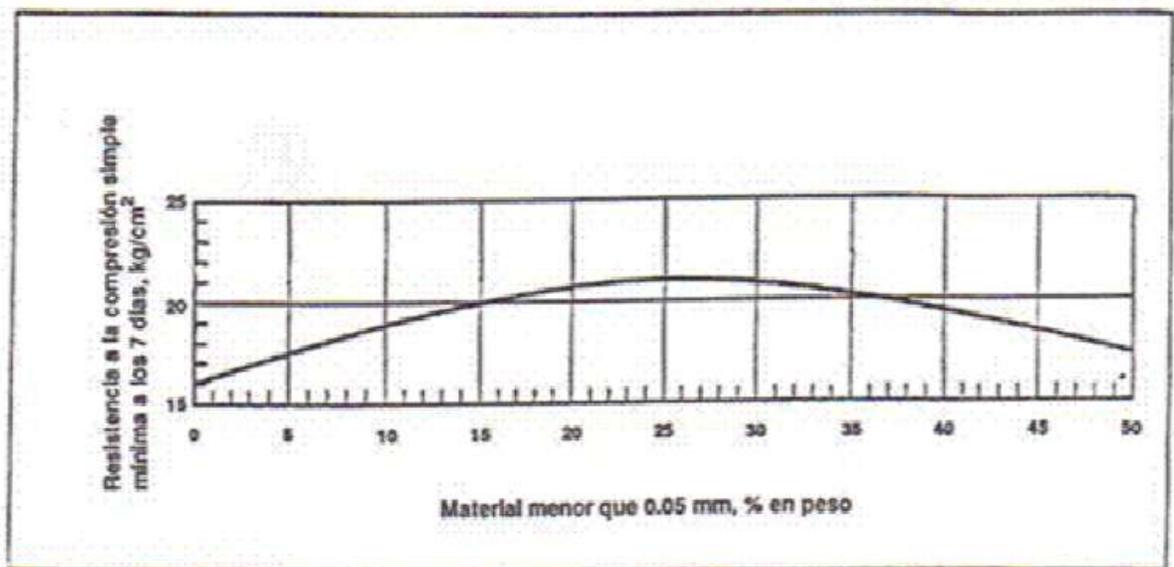


Figura 2.10 Resistencia a la Compresión Simple a los 7 días

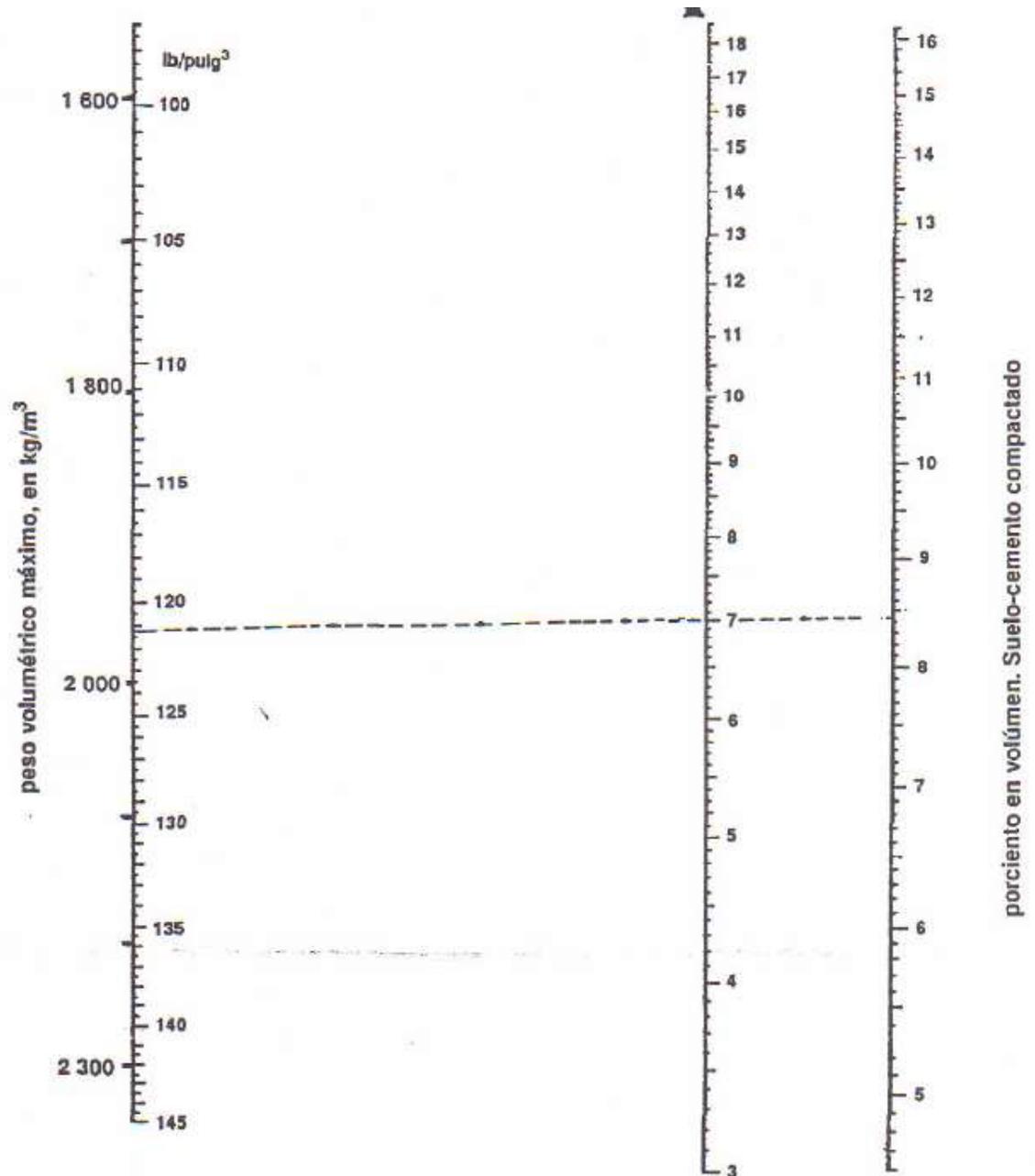


Figura 2.11 Obtención del porcentaje de cemento en volumen a partir del porcentaje de cemento en peso PCA.

La variante “B”, se desarrolla en los pasos siguientes:

- a. Obtener el peso volumétrico máximo promedio utilizando la Fig. 2.12.
- b. Este peso junto con el porcentaje de material menor de 0.05 mm (malla No 270) y el porcentaje de material retenido en la malla N° 4 se utilizaran para determinar el contenido de cemento en peso para el ensayo Próctor estándar por medio de la Fig. 2.13.
- c. Realizar el ensayo Próctor estándar correspondiente para obtener el contenido de humedad óptimo y el máximo peso volumétrico seco.
- d. Con el máximo peso volumétrico encontrado se determina el contenido de cemento en peso, ayudándose otra vez de la Fig. 2.13
- e. Con el contenido de cemento, así como con el máximo peso volumétrico seco y la humedad óptima obtenidas en el ensayo Próctor, se fabrican 3 especímenes para hacerles la prueba de resistencia a la compresión simple.
- f. Del resultado de las pruebas se determina la resistencia a la compresión simple promedio de los especímenes, probados después de 7 días de curado húmedo y de tenerlos 4 horas en saturación por inmersión en agua, inmediatamente antes de hacer los ensayos.
- g. Con la ayuda de la Fig. 2.14 se determina una resistencia a la compresión mínima permisible para la mezcla de suelo-cemento.

MEZCLAS DE SUELOS QUE CONTIENEN
MATERIAL QUE SE RETIENE EN LA MALLA N.4

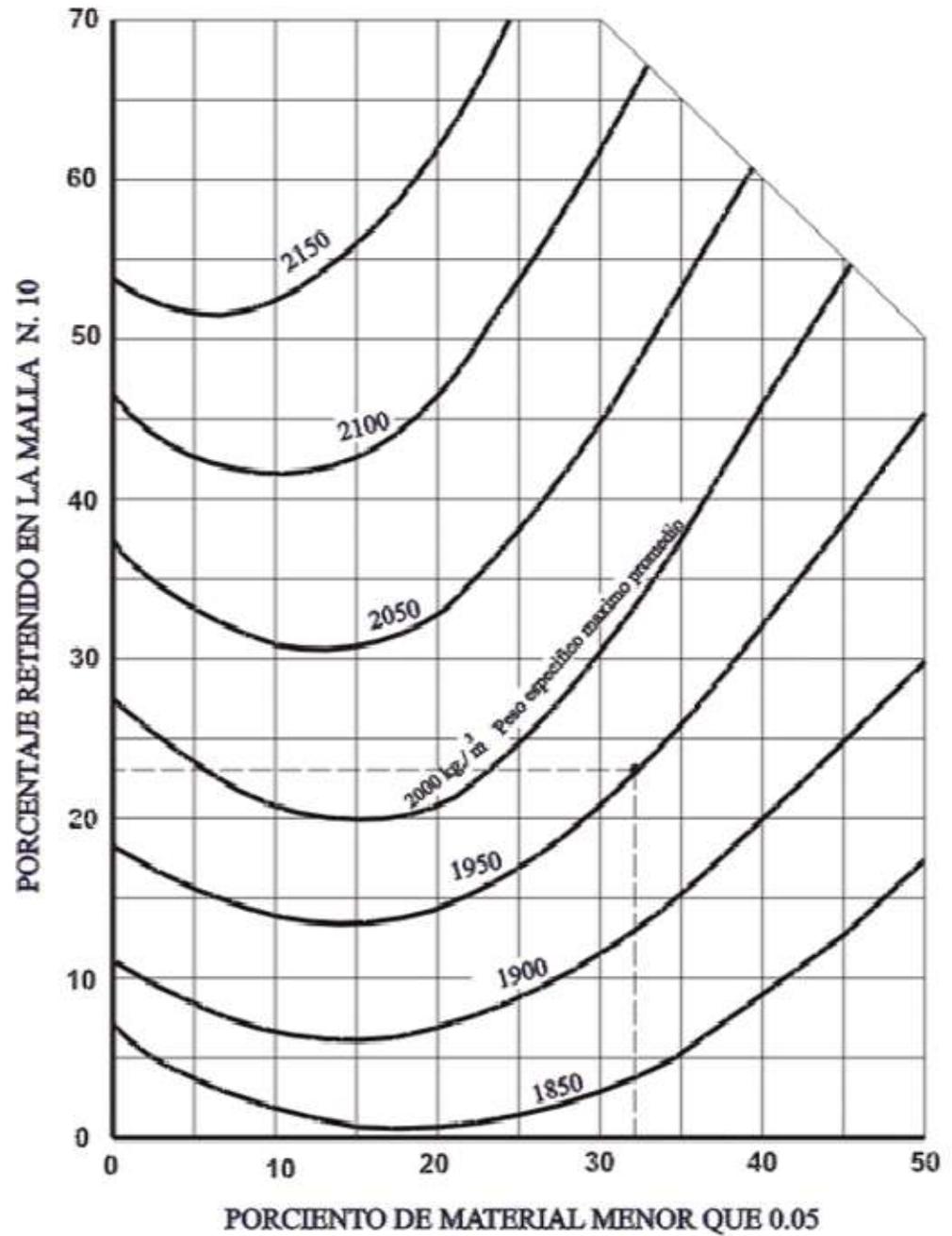
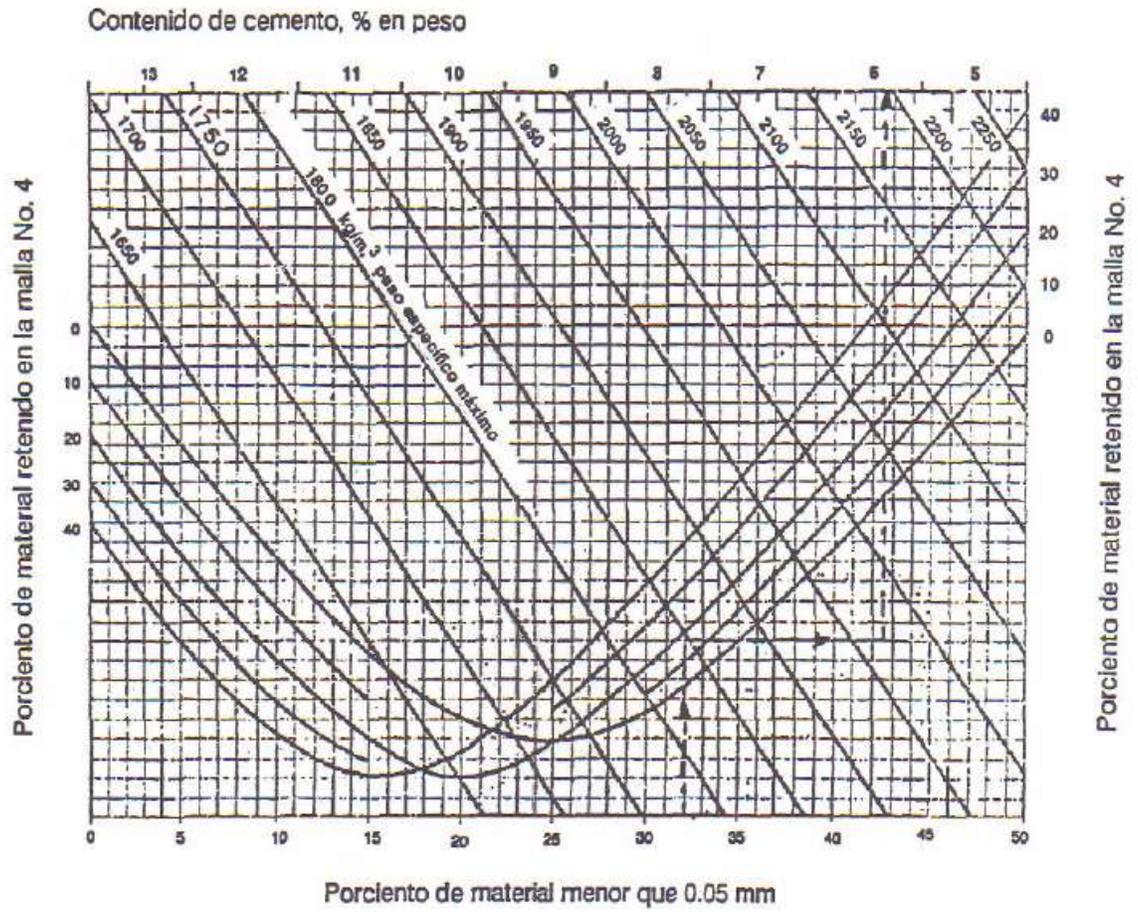


Figura 2.12 Obtención de los pesos volumétricos máximos promedios



*Figura 2.13 Obtención de porcentajes de Cemento para mezclas de suelo cemento
PCA*

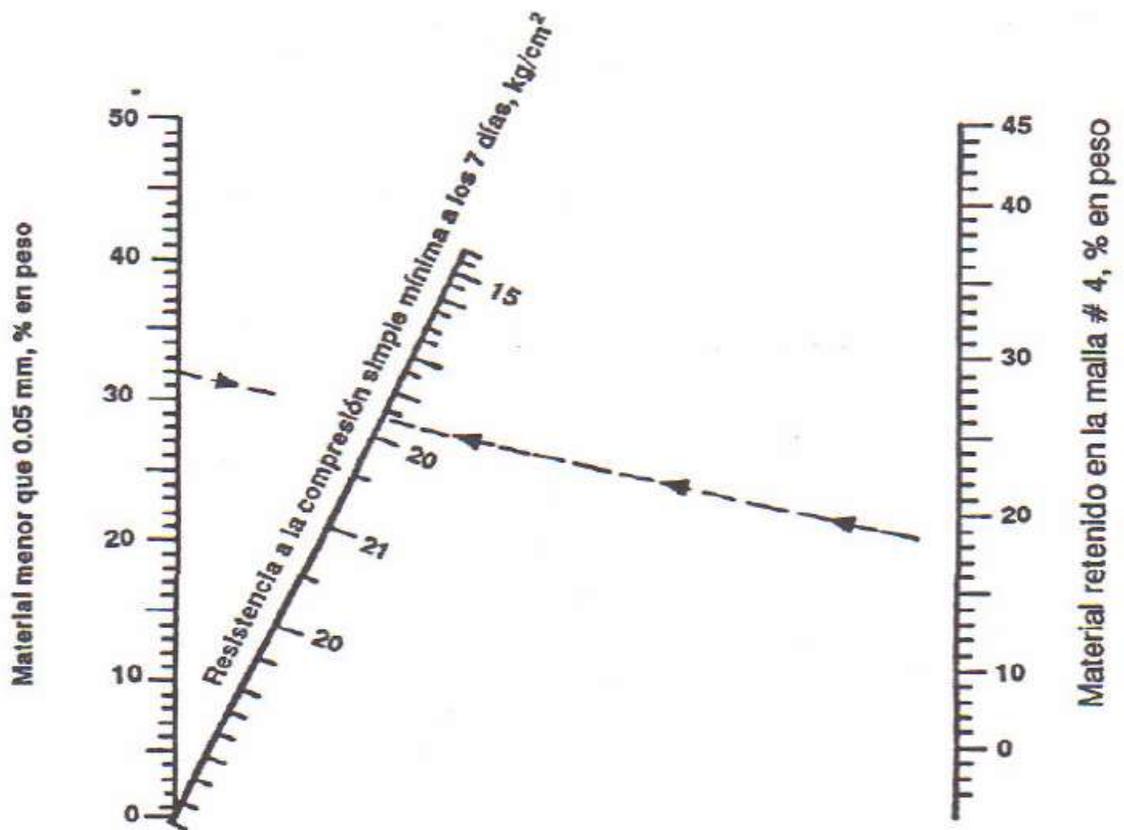


Figura 2.14 Obtención de las Resistencias a Compresión Simple para mezclas PCA

Si la resistencia a la compresión simple obtenida es igual o mayor que la mínima permisible significará que el contenido de cemento requerido es el adecuado. Si el valor obtenido es menor entonces se deberán realizar la serie de pruebas completas.

Método rápido de la PCA.

Se utiliza para obras de emergencia y para obras de poca importancia. Consiste en:

- La elaboración de especímenes que se compactan con la humedad óptima próctor y peso volumétrico máximo. La cantidad de cemento inicial aplicada variará en un amplio rango.
- Después de uno o dos días de curado se someten las probetas a piquetes con punzón, si no es posible penetrar en el espécimen más de 0.6 cm. y si al golpearlo se escucha un sonido claro y sólido, se considera que el contenido de cemento es adecuado.

2.9. PROCESO CONSTRUCTIVO DE BASES Y SUBBASES DE SUELO CEMENTO

El objetivo primordial en la construcción de las bases de suelo cemento es obtener un material completamente mezclado, adecuadamente compactado y curado.

El procedimiento de construcción merece ser cuidadosamente meditado para lograr la máxima eficiencia y certeza de éxito. Las dimensiones de las secciones por construir deberán estar acordes con la disposición del equipo, material y personal, así como de las características de los diferentes suelos y de las condiciones climatológicas.

2.9.1. Actividades Previas

Como en todo proyecto de ingeniería civil, deben realizarse algunas actividades previas a la construcción propiamente dicha, por lo que es necesario revisar la programación de la obra: secuencia lógica de actividades, tiempos de ejecución de actividades, ruta crítica y estrategias que garanticen la máxima eficiencia, con el fin de identificar y prever posibles problemas de recursos materiales o humanos, y anticipar las soluciones más viables. Previo a la construcción, es necesario contar con especificaciones técnicas y un plan de control de calidad propios del proyecto, así como también el diseño de mezcla y haber realizado un tramo de prueba y haber efectuado una inspección general del trayecto en cuestión para verificar la limpieza; cambios en los tipos de suelos; trabajos topográficos; trabajos de corte, relleno y estabilización de zonas de bajo nivel de soporte y condiciones climáticas.

Tramo de Prueba:

El tramo de prueba o pista de prueba es una práctica que busca garantizar la efectividad del planeamiento, los materiales y el proceso constructivo. Los principales objetivos de construir el tramo de prueba son:

Conocer los equipos: Para determinar su confiabilidad y verificar los rendimientos contemplados en la programación y observar su desempeño y comportamiento en la ejecución del proceso constructivo.

Preparación del personal: Permite a todo el personal involucrado en el proceso constructivo (auxiliares, operadores de maquinaria y equipo, laboratoristas, ingenieros, etc.) familiarizarse con este.

Revisar el Programa de obra: Los rendimientos reales obtenidos en el tramo de prueba se deben confrontar con la programación de trabajo y decidir posibles ajustes para cumplirla o si se debe reprogramar el proyecto por las condiciones locales.

Identificar problemas potenciales y establecer soluciones alternas: Desde la realización del tramo de prueba pueden advertirse problemas logísticos que difícilmente se perciben durante el proceso de planeación. Este es el momento para hacer los ajustes necesarios y predecir con más precisión el desempeño de los trabajos realizados.

Verificar aspectos técnicos de diseño: permite realizar verificaciones y ajustes de aspectos tales como el proporcionamiento de la mezcla, humedades óptimas, compactación (establecer equipos y número de pasadas), y la calidad y comportamiento de los materiales a utilizar.

2.9.2. Preparación del terreno

Al iniciar la construcción se debe asegurar que la configuración geométrica y los niveles superficiales estén acordes a las cotas del proyecto, además, verificar que no exista cualquier tipo de objetos extraños como rocas de gran tamaño, escombros y vegetales que, por su carácter orgánico, pueden inhibir la reacción del cemento.

2.9.3. Elaboración de la mezcla de suelo cemento

En general existen dos formas de realizar el proceso constructivo de las capas de suelo cemento: cuando es mezclado in situ, con el cual se pretende modificar las propiedades del material directamente en el sitio donde es encontrado; y el suelo cemento mezclado en planta, proceso que permite un mayor control de la mezcla que luego es transportada y colocada.

➤ **Suelo cemento in-situ.**

Para elaborar suelo cemento in-situ, puede utilizarse suelo de un banco de préstamo o suelos existentes en el lugar de ejecución de la obra, siempre y cuando cumplan ciertos requisitos técnicos. Este proceso comprende una serie de actividades sucesivas, encaminadas a asegurar que la capa estabilizada cumpla los estándares de calidad especificados. Generalmente las actividades programadas en su orden son:

- Escarificación y mejoramiento previo de la vía.
- Dosificación del cemento.
- Mezclado del suelo con el cemento.
- Conformación y compactación.
- Curado.

Cada una de las actividades mencionadas se puede realizar de diversas formas, dependiendo del personal, equipo y experiencia con la que se cuenta, a continuación se detallan algunas de estas:

Escarificación y mejoramiento previo de la vía.

Una vez retirados todos los contaminantes que puedan afectar el proceso de mezclado se procede a escarificar y pulverizar el suelo, pre-humedeciéndolo si es necesario. La escarificación consiste en arañar la superficie del terreno para disgregar superficialmente el material, sacar materiales indeseados o crear adherencia entre capas.

Dosificación del cemento.

El método utilizado para el cálculo de la dosificación del cemento, básicamente, pretende determinar la cantidad a colocar en la superficie, para obtener el contenido de cemento necesario en el espesor de diseño.

En general existen tres métodos para la dosificación del cemento en obra:

- Dosificación del cemento a granel. Este proceso requiere de un equipo esparcidor, el cual puede ser mecánico o automático. El esparcidor mecánico

puede ser cualquier vehículo con capacidad de almacenamiento de cemento, al cual se le adapta un "bukey" o esparcidor en la parte trasera.

- Dosificación del Cemento en bolsas o sacos. Conociendo el contenido de cada bolsa (50.0 Kg. en nuestro medio) y teniendo en cuenta el porcentaje de cemento que se va adicionar, se calcula el volumen de material al que corresponde cada saco así:

$$V = (A * E * L) * \%Cem = 50.0 \text{ kg}$$

Dónde:

A: Ancho del carril elegido.

L: Longitud relativa a cada saco.

E: Espesor de diseño de la capa de suelo-cemento.

50.0 Kg.: Peso de la bolsa de cemento.

Se asume *A* y se despeja *L*.

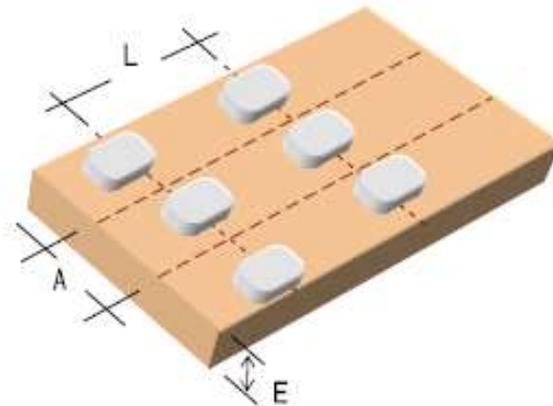


Figura 2.15 Dosificación del cemento en bolsas

Se verifica la relación: A/L Si ésta es mayor de 1.4 o menor de 0.6 se aplica de nuevo la fórmula aumentando o quitando un carril según el caso. La relación más cercana a 1 dará el número óptimo de carriles a utilizar. La Fig. 2.15 ilustra mejor las variables.

- Dosificación del cemento por vía húmeda. En este procedimiento juega un papel muy importante la nueva tecnología utilizada para mezcla del suelo-cemento, la cual permite evitar los procesos de dosificación descritos anteriormente. En este tipo de dosificación el cemento llega al suelo mezclado con el agua en forma de lechada inyectada directamente en el rotor del equipo de mezclado. Generalmente los equipos utilizados para este tipo de dosificación requieren condiciones de humedad controladas y, dados sus altísimos rendimientos, son poco utilizadas en nuestro medio.

Mezclado del suelo con el cemento.

Se busca que el cemento y el suelo se unan íntimamente, permitiendo así la homogeneidad del material y el buen comportamiento mecánico ante las solicitaciones del tráfico.

Es claro que en una mezcla homogénea el cemento presente envuelve todas las partículas del suelo, mientras que en mezclas no homogéneas se forman grumos que finalmente contribuyen a una separación entre el suelo y el cemento, haciendo que actúen en forma independiente sin proporcionar el efecto deseado.

La calidad de la mezcla dependerá también del control de la humedad del suelo, por lo que se tiene que verificar constantemente, y corregirse cuantas veces sea necesario para obtener una humedad lo más cercana posible a la óptima.

Colocación del suelo cemento en Situ.

- Colocación con motoniveladora.
Se debe tener en cuenta que la capa extendida con la motoniveladora debe quedar lo más pareja posible para evitar densidades diferenciales al momento de la compactación. También es importante controlar los tiempos de operación

en el momento de la conformación, los cuales no deben exceder de una hora, pues el suelo-cemento lleva un tiempo prudencial siendo transportado.



Figura 2.16 Extendido de material con Motoniveladora

Se debe calcular el espaciamiento de la colocación de los viajes transportados, pues no se debe transportar el material tramos largos con la motoniveladora. Además ayuda al rendimiento en el proceso de distribución de material en la superficie.

- Colocación con finisher.
Este tipo de equipos son recomendados para el proceso porque dejan más homogénea la capa a compactar y, en condiciones controladas, se alcanzan mayores rendimientos. Su única limitante es la restricción del espesor, pues en capas mayores de 15 centímetros puede necesitarse una doble capa, lo cual dificultaría el proceso y reduciría los rendimientos.



Figura 2.17 Colocado de suelo cemento con Finisher

2.9.4. Conformación y Compactación

Compactar es conseguir la unión de las partículas del suelo, eliminando los espacios que quedan entre ellas. Se utilizan medios mecánicos que van desde el peso de los equipos en rodillos estáticos, pasando por el punzonamiento y amasado del suelo en compactadores tipo "Pata de Cabra" y llegando hasta los rodillos vibratorios modernos que buscan reacomodar las partículas imprimiendo energía vibratoria al material.

La compactación debe iniciarse lo más pronto posible después del humedecimiento de la mezcla y debe completarse en un intervalo de dos horas a partir del mezclado inicial, ya que la compactación tardía genera efectos perjudiciales en la densidad alcanzada. Se debe tener en cuenta que no puede pasar mucho tiempo para esta operación, pues cuando el cemento empieza a fraguar no es conveniente la vibración del equipo porque esta, micro-fisura la capa estabilizada.

La compactación se hace en forma similar a la que se haría si los suelos no contuvieran cemento, para alcanzar la máxima densidad, la mezcla debe ser compactada con una humedad cercana a la humedad óptima, la mayoría de especificaciones requieren que se alcance una porcentaje de compactación entre el 95 y el 98% de la densidad máxima obtenida con la prueba AASHTO T-134, AASHTO T-180, o ASTM D 558, D-1557.

2.9.5. Control de Contracciones

Generalmente las contracciones generadas por la pérdida de agua de la mezcla de suelo cemento se pueden controlar por medio de juntas, aunque las contracciones en las capas de suelo cemento son relativamente mínimas debido a que las cantidades de cemento utilizado son pequeñas, la mayoría de especificaciones y literatura técnica relacionada con juntas en capas de suelo cemento, hace referencia a juntas transversales de fin de jornada o longitudinales de construcción tanto en mezclas realizadas in situ, como mezclas en planta.

2.9.6. Curado

Como en todo proceso de curado de mezcla con cemento lo que se busca son condiciones buenas de fraguado. Aunque se afirma que el suelo-cemento estará continuamente aumentando su resistencia, se debe garantizar que gran porcentaje de ella se obtenga en edades tempranas.

El apropiado curado del suelo-cemento es importante porque la ganancia de resistencia es dependiente del tiempo, la temperatura, y la presencia de humedad. Generalmente, el periodo que se requiere de curado es de 3 a 7 días, tiempo durante el cual se prohíbe el paso del equipo más pesado.

2.9.7. Control de Calidad

El control de calidad es esencial para garantizar que el resultado final sea adecuado. Adicionalmente, se debe garantizar que el contratista haya realizado el trabajo acorde a los planos y especificaciones. Según el ACI la inspección de campo en la construcción del suelo cemento involucra el control de los siguientes factores:

1. Pulverización / granulometría.
2. Contenido de cemento.
3. Cantidad de agua. (humedad)
4. Uniformidad del mezclado.
5. Compactación.
6. Espesor y tolerancia geométrica de la superficie.

7. Curado.

Otras instituciones agregan a los criterios del ACI, otros factores como son el control del almacenamiento de materiales y el cumplimiento del tiempo de ejecución, que es muy similar al control requerido para el concreto. Así como la inmediata reparación de los defectos y el control de la correcta liga entre capas.

3. CAPÍTULO N°3: RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1. COMPONENTES DEL ESTUDIO

3.1.1. La unidad de estudio

- ✓ Las Propiedades Mecánicas del suelo – cemento, aplicado para un tipo de suelo Arena Arcillosa.

Los elementos que serán medidos son las siguientes propiedades:

- Módulo de Elasticidad [kg/cm^2]
- Resistencia a la Compresión [kg/cm^2]
- CBR (Valor soporte California) [%]

3.1.2. Población

Propiedades Mecánicas del Suelo – Cemento.



Figura 3.18 Población: Propiedades Mecánicas del suelo cemento

3.1.3. Muestra

Selección de las principales propiedades mecánicas del Suelo – Cemento que serían estudiadas en este trabajo de investigación.

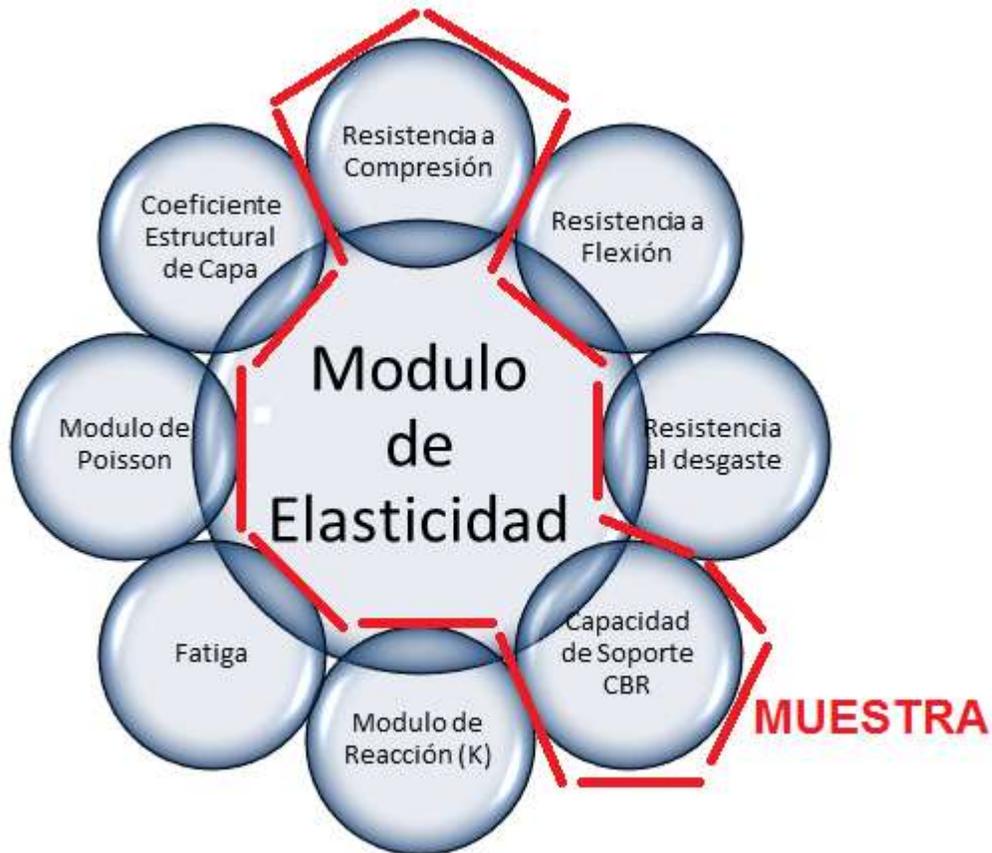


Figura 3.19 Selección de la Muestra

3.2. PROCEDIMIENTOS DE APLICACIÓN

Para el presente trabajo se aplicará **LA NORMATIVA AASTHO PARA SUELOS CEMENTOS (American Association of State Highway and Transportation Official) Y ASTM**, para todos los ensayos de laboratorio, ya sea para los de caracterización como para los de aplicación experimental, debido a que esta es la más confiable y utilizada en muchos Países del mundo y especialmente de América Latina.

3.2.1. Ensayos de Laboratorio

El trabajo de investigación comprende los siguientes ensayos de laboratorio que se realizarán de acuerdo a la norma de referencia que especifica para cada uno de ellos, y son los siguientes:

- Granulometría 2 ensayos, **REFERENCIA ASTM D 422-63**
- Límites de Atterberg 2 ensayos, **REFERENCIA ASTM D 4318-00**
- Contenido de Humedad y Clasificación de suelos, **REFERENCIA AASTHO Y ASTM**
- Grado de finura del cemento 5 ensayos, **REFERENCIA ASTM C 430**
- Peso Específico del Cemento 3 ensayos, **REFERENCIA NB 064**
- Compactación 5 ensayos, 1 para el suelo puro y 4 para las dosificaciones del suelo cemento, **REFERENCIA PROCTOR AASTHO T - 180 ASTM D 1557**
- CBR 32 ensayos, 8 para cada dosificación de suelo cemento, (valor soporte California), **REFERENCIA ASTM D 1883**
- Módulo de Elasticidad 64 ensayos, 16 para cada dosificación de suelo cemento, **REFERENCIA ASTM D597-02 (Método de ensayo estándar para velocidad de pulso a través del concreto).**
- Resistencia a Compresión 64 ensayos, 16 para cada dosificación de suelo cemento **REFERENCIA ASTM D 1633-96**

Se realizarán en el Laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho de la Carrera de Ingeniería Civil, a excepción de que por algún motivo de fuerza mayor se deba realizar alguno de estos ensayos en otros laboratorios.

3.2.2. Preparación Previa para la Aplicación de Instrumentos y/o Equipos

Se procederá a la **calibración** previa de todos los instrumentos y/o equipos que se utilizarán en los ensayos de laboratorio mencionados anteriormente, para esto se realizarán ensayos de prueba con un número de especímenes de 3 a 5 por instrumento, de esta manera poner a prueba y verificar que dichos instrumentos y/o equipos cuenten con los requisitos necesarios para obtener resultados confiables y precisos de cada ensayo.

3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS

Se procederá primeramente a la caracterización de los materiales a utilizar en el trabajo de investigación como ser:

- ✓ **El tipo de Suelo a mejorar**, que para el presente trabajo será una *Arena – Arcillosa* obtenida mediante el muestreo mencionado anteriormente. Se realizara el ensayo granulométrico respectivo por el método del lavado ya que se trata en su mayoría de material fino como nos dice la norma ASTM D 422-63. Posteriormente se realizara el ensayo de los Limites de Atterberg para determinar el limite líquido y el limite plástico, siguiendo los procedimientos indicados en la norma ASTM D 4318-00, una vez obtenidos estos resultados se podrá clasificar el tipo de suelo por el método AASTHO y/o ACI verificando que se trata de una arena – arcillosa.
- ✓ **Tipo de Cemento a utilizar**, se procederá a realizar el ensayo de finura del cemento con referencia ASTM C 430 y peso específico con referencia NB 064, para corroborar que cumpla con las especificaciones técnicas *según norma ASTM C-150* ya que este producto es elaborado según la *NB – 001*. Utilizaremos para la presente investigación el **TIPO IP-30** que es el más común y de uso general en el mercado, se utiliza en todos los casos en que las obras no requieran altas resistencias iniciales como por ejemplo: muros de contención, mampostería, canales de drenaje, pisos, revoques, cámaras de alcantarillas, muros de ladrillos (cerramientos), desagües industriales, alcantarillados, plantas de aguas servidas, piletas para tratamiento de aguas, plantas de industrias químicas (especialmente para procesos fermentativos), hormigón masivo. Donde I: Hace referencia al Tipo I de cemento; P: Referente a la adición de Puzolana; 30 Resistencia a compresión a los 28 días.

Seguidamente se realizara el *ensayo de Compactación de acuerdo a la norma PROCTOR AASTHO T - 180 ASTM D 1557* es aplicable para la determinación de la relación humedad-densidad de suelos únicamente, pero debido a que esta proporciona mayor energía de compactación, hoy en día es utilizada también para mezclas de suelo cemento, que nos permitirá encontrar la humedad óptima para alcanzar la densidad

máxima del suelo en estudio para aplicarlo a las diferentes dosificaciones de suelo – cemento.

Luego sigue la *Elaboración de Especímenes de Prueba según norma ASTM D 1632-96*, se utilizaran especímenes cilíndricos de suelo cemento compactado, antes de realizar los especímenes, es necesario conocer la humedad presente en la mezcla de suelo cemento a la cual se debe compactar (humedad óptima), para alcanzar el máximo grado de compactación posible (densidad máxima) de los especímenes de prueba, tanto para el suelo natural como para los diferentes porcentajes de cemento.

Se elaboraran primeramente 8 para cada ensayo a la edad de prueba de los 3 días, es decir 8 muestras para el ensayo de CBR, otras 8 para la Resistencia a Compresión y otros 8 para el Modulo de Elasticidad, que corresponderían 2 para cada dosificación (3%, 6%, 9%, 12%) haciendo en total de 24 muestras para la primera edad de prueba.

De esta manera sucesivamente para cada edad de prueba controlando el tiempo correspondiente a la demora por cada ensayo.

Posteriormente realizado los *ensayos de CBR, Resistencia a la Compresión y el Modulo de Elasticidad* con el especímenes de prueba para las diferentes dosificaciones, se ordenara los datos y resultados obtenidos en una planilla que se ilustrara en la parte de anexos, y poder aplicar el *Modelo Estadístico* de la Regresión Múltiple para cada una de las mismas, de esta manera general los *modelos matemáticos de correlación* entre cada variable. Y por último la correlación matemática *entre las mismas propiedades*.

Las técnicas de muestro aplicadas en este trabajo de investigación y mencionadas anteriormente son exclusivamente Probabilísticas, debido a que siempre pueden haber un grado de error ya sea en la parte operacional o en los equipos utilizados en la práctica.

3.4. PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS Y LA INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para analizar los resultados que se obtendrán de los ensayos realizados, como se describe anteriormente, será necesario realizar un análisis estadístico, por lo que para determinar la relación existente entre las variables analizadas se utilizara el método estadístico más idóneo.

En toda investigación en donde se requiera hacer uso de ensayos o procesos de laboratorio, intervienen una serie de variables en el proceso que afectan los resultados esperados, inclusive cuando se realizan procedimientos normados o estandarizados. Estas discrepancias entre los resultados obtenidos y los resultados esperados se pueden atribuir a factores ambientales, instrumentales, de procedimiento, a los componentes o reactivos utilizados, a la experiencia de quien realiza los ensayos u otras variables que consciente o inconscientemente no se controlan.

Existen técnicas estadísticas que permiten disminuir el impacto de estas discrepancias atribuidas a variables no controladas, mediante un “ajuste” de datos o regresión.

El análisis de regresión nos da la capacidad de representar una serie de datos o de resultados, por medio de un modelo matemático que describa con exactitud su comportamiento respecto a determinadas variables.

En algunos casos es necesario relacionar más de dos variables, ya que de alguna de ellas dependen directamente las otras, cuando se presenta esta situación es preciso realizar una **regresión múltiple**.

Ante las condiciones presentes, se realizará una regresión múltiple de dos variables independientes (Edad y porcentaje de cemento), los cálculos requeridos para evaluar cada uno de los posibles modelos matemáticos presentan cierto grado de complejidad, por lo que es recomendable utilizar algún software capaz de realizarlos, en la investigación se realizaran los cálculos con la ayuda de algunos programas para estadística.

El tipo de estudio que se realizara es Descriptivo o **Correlacional**, por tanto la estadística nos pide un mínimo de 30 ensayos por grupo o variable, a continuación presento la distribución de dichos ensayos por variable y el total de la investigación:

Son tres variables: *CBR (Valor Soporte California)*, *Resistencia a la Compresión* y *Módulo de Elasticidad*.

Procediendo de la siguiente manera para las tres variables, se prepara 2 especímenes por dosificación, son 4 dosificaciones haciendo un total de 8 ($2 \times 4 = 8$), esto para la primera edad de prueba que es a los 3 días, en total son 4 edades de prueba (3, 7, 28, 60 días), obteniendo un total de 32 ensayos ($8 \times 4 = 32$). En total de toda la investigación para las 3 variables se obtendrán 96 ensayos ($32 \times 3 = 96$). Sin contar con los especímenes que se utilizaran para la calibración de los equipos que serían 3 por ensayo haciendo un total de 9 ($3 \times 3 = 9$), sumando un total de especímenes de $96 + 9 = 105$ para toda la investigación.

Para tener un panorama más claro del análisis de la información se presentara en la parte de anexos el modelo de las tablas de recolección de datos.

3.5. RECONOCIMIENTO DEL SITIO DE APLICACIÓN

La extracción de la muestra se realizara en la entrada del camino al Rancho Sud está casi sobre la carretera principal al frente del surtidor de combustible, en dicho lugar se pudo evidenciar la presencia de gran cantidad de arena arcillosa debido a la naturaleza del lugar, además en esta parte se están formando grandes urbanizaciones que cuentan con caminos de apertura compuestos por este material, por tanto en un futuro se podría aplicar este método en la zona.



(a)



(b)

Figura 3.20 (a) y (b) Imagen satelital del sitio de Aplicación

3.6. MATERIALES A UTILIZAR EN LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS DE PRUEBA

3.6.1. Suelo a Utilizar

Como se mencionó anteriormente utilizaremos un suelo tipo Arena Arcillosa que se extrajo entrada del camino al Rancho Sud está casi sobre la carretera principal al frente del surtidor de combustible, que posteriormente se verificara en laboratorio las características del mismo.

Muestreo:

De acuerdo con una inspección visual y manual, se supuso que era un suelo areno arcilloso característico de la zona. El cual posteriormente se comprobara con la realización de una clasificación del suelo con propósitos de ingeniería (Ver Figura 3.21)



Figura 3.21 Arena Arcillosa del lugar

Hay que tomar en cuenta que la muestra esté libre de material orgánico para esto se obtendrá la muestra de una profundidad de extracción de unos 50 centímetros para lograr una homogeneidad en la misma (Ver Figura 3.22)



Figura 3.22 (a) y (b) Excavación para la extracción del material

3.6.2. Cemento a Utilizar

Se debe emplear cemento de fabricación nacional, cuyas características satisfagan las especificaciones para cemento Pórtland Tipo I (ASTM C -150) y que cumplan las exigencias de las NORMAS BOLIVIANAS (N.B. 2.1 - 001 hasta N.B. 2.1 - 014).

En base a lo mencionado anteriormente se utilizará para el trabajo de investigación el cemento de la fábrica “SOBOCE CEMENTO EL PUENTE” tipo IP30, que tiene las siguientes características:



Figura 3.23 Cemento el Puente Tipo IP30

IP-30: Se utilizará en todos los casos en que las obras no requieran altas resistencias iniciales como por ejemplo: muros de contención, mampostería, canales de drenaje, pisos, revoques, cámaras de alcantarillas, muros de ladrillos (cerramientos), desagües industriales, alcantarillados, plantas de aguas servidas, piletas para tratamiento de aguas, plantas de industrias químicas (especialmente para procesos fermentativos), hormigón masivo. Para este tipo de cementos se tiene que según la NB – 001 el cemento debe cumplir las siguientes características:

Tabla 3.21 Características del Cemento IP30 según la NB-001

| PARAMETRO | UNIDAD | NB-001 |
|---------------------|---------------------|--------|
| P.P.I. | % | <7.00 |
| MgO | % | <=6.00 |
| SO ₃ | % | <=4.00 |
| Inicio de Fraguado | hr | >0.75 |
| Final de Fraguado | hr. | <10.00 |
| Blaine | cm ² /gr | <2600 |
| Expansión | % | <=1.00 |
| Resistencia 3 Días | Kg/cm ² | - |
| Resistencia 7 Días | Kg/cm ² | >=170 |
| Resistencia 28 Días | Kg/cm ² | >=300 |

3.6.3. Agua a Utilizar

El agua utilizada para la realización de los ensayos fue obtenida de la red pública, esta es potable por lo que se considera que no genera ningún problema en la mezcla, ya que el agua que se emplee para la fabricación de suelo cemento debe estar limpia de cualquier cantidad objetable de materia orgánica, álcalis y otras impurezas que puedan tener una reacción indeseable con el cemento utilizado. El agua que se utilizo fue agua potable obtenida de la red pública.

3.7. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO PARA PROPÓSITOS DE INGENIERÍA

3.7.1. Análisis Granulométrico

El análisis del tamaño de las partículas conocido también como análisis granulométrico del suelo, consiste en determinar el rango del tamaño de las partículas presentes en un suelo, expresado como un porcentaje de la masa seca total. Con el advenimiento de la técnica del cribado, fue posible efectuar el trazo de curvas granulométricas, contando con agrupaciones de las partículas del suelo en mayor número de tamaños diferentes.

Debido a la gran variedad de tamaños de las partículas de un suelo, los científicos han tratado de dividir en secciones toda la escala de tamaños. Se han propuesto muchas divisiones, todas son arbitrarias y ninguna es mejor que la otra. La escala y criterios adoptadas por ASTM (American Society for Testing and Materials) se muestra en la fig. 3.24 y tabla 3.22 y en la tabla 3.23 de la guía AASHTO.

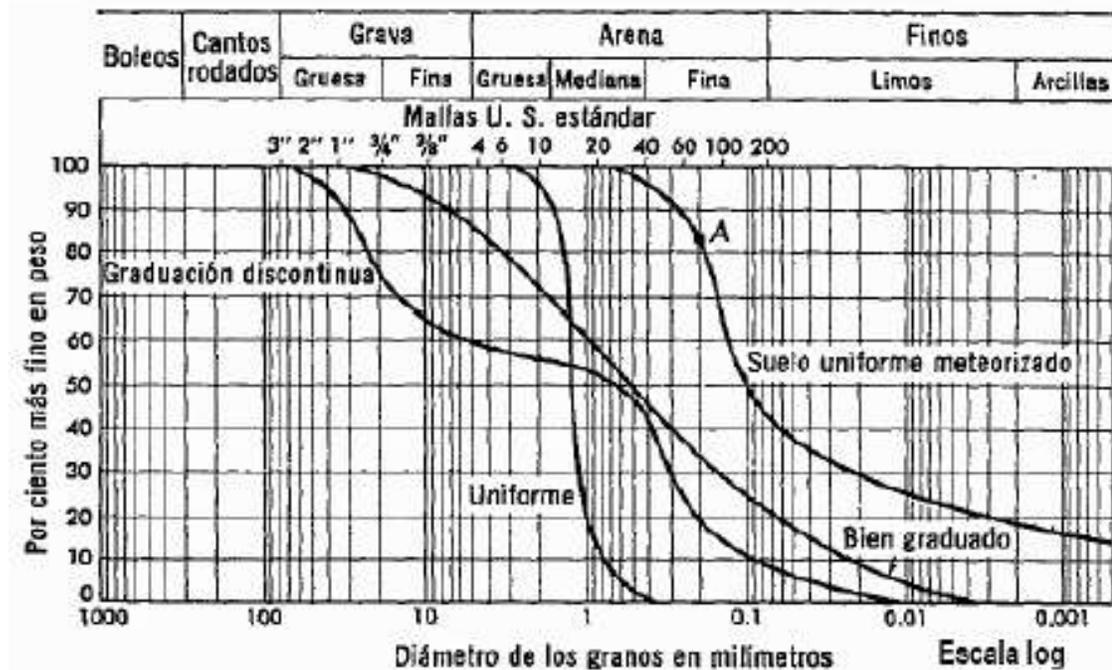


Figura 3.24 Representación gráfica de las partículas de un suelo

Fuente: Introducción a la Mecánica de suelos y cimentaciones (Sowers and Sowers).

Tabla 3.22 Clasificación de suelos según ASTM

Fuente: Norma ASTM D 2487

| DIVISION PRINCIPAL | | SIMBOLO DEL GRUPO | NOMBRES TÍPICOS | CRITERIO DE CLASIFICACION | | | |
|--|---|---|---|---|---|----|--|
| SUELOS DE GRANDES GRUESOS 50% o más es retenido en el tamiz No. 200 | GRAVAS 50% o más de la fracción gruesa es retenido en el tamiz No. 4 | GW | Gravas bien gradadas y mezclas de arena y grava con pocos finos o sin finos | $C_u = \frac{D_{60} D_{10}}{(D_{30})^2}$ Mayor que 4 $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \times D_{30}$ Entre 1 y 3 Si los criterios para GW no se cumplen Límites de Atterberg localizados bajo la línea "A" o índice de plasticidad inferior a 4. Límites de Atterberg sobre la línea "A" e índice de plasticidad superior a 7. Si los límites de Atterberg se localizan en el área sombreada se debe clasificar utilizando símbolos dobles | | | |
| | | GP | Gravas y mezclas de gravas y arenas mal gradadas con pocos finos o sin finos | | | | |
| | | GM | Gravas limosas, mezclas de grava - arena y limo | | | | |
| | | GC | Gravas arcillosas, mezclas de grava - arena y arcilla | | | | |
| | ARENAS Mas del 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz No. 4 | ARENAS LIMPIAS | SW | Arenas y arenas gravosas bien gradadas con pocos finos o sin finos | Clasificación basada en el porcentaje de finos Menos del 5% pasa por el tamiz No. 200 GW, GP, SW, SP Mas del 12% pasa por el tamiz No. 200 GM, GC, SM, SC 15% o 12% pasa por el tamiz No. 200 Para clasificación de frontera se necesitan símbolos dobles $C_u = \frac{D_{60} D_{10}}{(D_{30})^2}$ Superior a 6 $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \times D_{30}$ Entre 1 y 3 Si no se cumplen los criterios para SW Límites de Atterberg localizados bajo la línea "A" o índice de plasticidad inferior a 4. Límites de Atterberg sobre la línea "A" e índice de plasticidad superior a 7. Para los límites de Atterberg localizados en el área sombreada se debe clasificar utilizando símbolos dobles. | | |
| | | | SP | Arenas y arenas gravosas mal gradadas con pocos finos o sin finos | | | |
| | | ARENAS CON FINOS | SM | Arenas limosas, mezclas de arena limo | | | |
| | | | SC | Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla | | | |
| | | | SUELOS DE GRANDES FINOS 50% o más pasa por el tamiz No. 200 | LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido de 50% o inferior | | ML | Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas |
| | | | | | | CL | Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, suelos sin mucha arcilla |
| OL | Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad | | | | | | |
| LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido superior a 50% | LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido superior a 50% | MH | Limos inorgánicos, arenas finas o limos micáceos o de diatomeas limos elásticos | | | | |
| | | CH | Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas | | | | |
| | | DH | Arcillas orgánicas de plasticidad alta o media | | | | |
| Suelos altamente orgánicos | PT | Turba, estiércol y otros suelos altamente orgánicos | Para la identificación visual y manual, véase ASTM norma D 2488 | | | | |

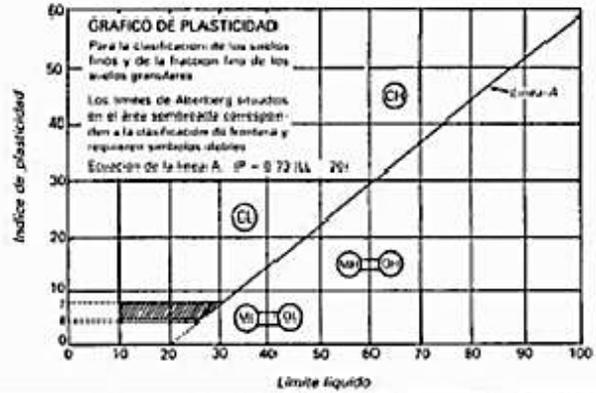


Tabla 3.23 Clasificación de Suelos Según AASTHO

| Clasificación General | Materiales granulares. (35% como máximo de la que pasa el tamiz N° 200) | | | | | | | Materiales limo arcillosos (más de 35% del total de la muestra que pasa el tamiz N° 200). | | | |
|---|---|---------|------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---|---------|--------------------|-----------------------|
| Clasificación por grupos. | A-1 | | A-3 | A-2 | | | | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 A-7-5 A-7-6 |
| | A-1-a | A-1-b | | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 | A-2-7 | | | | |
| Análisis por mallas, porcentaje que pasa el tamiz. | | | | | | | | | | | |
| N° 10 | 50 máx. | | | | | | | | | | |
| N° 40 | 30 máx. | 50 máx. | 51 máx. | | | | | | | | |
| N° 200 | 15 máx. | 25 máx. | 10 máx. | 35 máx. | 35 máx. | 35 máx. | 35 máx. | 36 máx. | 36 máx. | 36 máx. | 36 máx. |
| Características de la fracción que pasa la malla N° 40. | | | | | | | | | | | |
| Límite líquido. | | | | 40 máx. | 41 min. | 40 máx. | 41 min. | 40 máx. | 41 min. | 40 máx. | 41 min. |
| Índice de plasticidad. | 6 máx. | NP | 10 máx. | 10 máx. | 10 máx. | 11 min. | 11 min. | 10 máx. | 10 máx. | 11 min. | 11 min. |
| Índice del grupo | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | |
| Tipos de materiales característicos. | Cantos, grava y arena. | | Arena fina | Grava y arena limo arcillosas. | | | | Suelos limosos | | Suelos arcillosos. | |
| Calificaciones. | Excelente a bueno. | | | | | | | Regular a malo. | | | |

Análisis del Tamaño de las Partículas del Suelo.

Existen pruebas mecánicas para determinar la granulometría de un suelo. Dentro de este tipo de pruebas encontramos para suelos de tamaños arriba de la malla N. 200 (0.075 mm.) el análisis mediante mallas, y para suelos con tamaños menores a 0.075mm el análisis de una suspensión del suelo mediante el hidrómetro (densímetro).

El análisis granulométrico para nuestra investigación se llevó a cabo por el análisis mediante mallas de acuerdo a la norma ASTM D 422-63, Reaprobada en 1998.

No se realizó un análisis hidrométrico, por lo que se realizó un análisis de la fracción del suelo con tamaño superior a 0.075mm. Se utilizó el procedimiento de lavado por malla N° 200 del material para que pudiera pasar la fracción fina del suelo (Fig. 3.25).



Figura 3.25 Lavado del material en el ensayo de granulometría por malla N° 200.

El análisis del suelo consistió principalmente en ordenar en forma descendente una serie de mallas, depositando el suelo previamente seco en un juego de mallas agitándolo en forma horizontal y vertical durante 10 minutos en un agitador para la fracción del suelo que paso la malla N° 10 y para los tamaños arriba de la malla N. 10 se realizó tamizando el suelo manualmente hasta que no se observó que pasara más del 1% del material retenido durante un minuto.

El tamaño de la porción retenida en el tamiz N° 10 dependerá del tamaño máximo nominal de la muestra, **el tamaño máximo (TM)** de una muestra de suelo es el menor tamaño de malla por el cual el cien por ciento de las partículas pasan dicha malla y el **tamaño máximo nominal (TMN)** Se define como la abertura de malla más pequeña por la cual debe pasar la mayor parte del agregado.

La masa mínima a utilizar se define de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 3.24 Masa mínima a utilizar en el análisis de material retenido en la malla No 10.

Fuente: Norma ASTM D 422-63.

| Tamaño máximo nominal de las partículas. Pulg. (mm.) | Masa mínima aproximada de la porción de suelo (gr.) |
|--|---|
| 3/8 (9.5) | 500 |
| ¾ (19.0) | 1000 |
| 1 (25.4) | 2000 |
| 1 ½ (38.1) | 3000 |
| 2 (50.8) | 4000 |
| 3 (76.2) | 5000 |

El suelo utilizado presento las siguientes características:

Tamaño máximo: $TM = \frac{3}{4}$.

Tamaño máximo nominal: $TMN = \frac{3}{8}$.

Basados en la tabla anterior, se tendría que utilizar para el análisis granulométrico 500 gr. de suelo como mínimo, sin embargo se pesaron 2000 gr para tener más precisión en la obtención de resultados.

Después se pesó el suelo retenido en cada malla teniendo mucho cuidado de evitar pérdidas de material, posteriormente, se calculó el porcentaje retenido en cada malla con respecto al peso total de la muestra y el porcentaje que pasa respecto a dicho total.

Por último, se graficó el porcentaje de material que paso, en peso, y el diámetro de la malla, una vez graficados los resultados, obtuvimos la llamada Curva de Distribución Granulométrica.

A continuación se presentan en la tabla 3.25 los resultados que se obtuvieron mediante el ensayo granulométrico realizado en 2 ocasiones para corroborar que haya similitud entre los resultados y mayor confiabilidad de los mismos:

Tabla 3.25 Resumen de Granulometría para el mismo Suelo

| GRANULOMETRÍA N°1 | | | GRANULOMETRÍA N°2 | | |
|-------------------|-------------|----------------------|-------------------|-------------|----------------------|
| Tamices | Tamaño (mm) | % Que Pasa del Total | Tamices | Tamaño (mm) | % Que Pasa del Total |
| 1/2" | 12,50 | 95,40 | 1/2" | 12,50 | 95,52 |
| 3/8" | 9,50 | 89,91 | 3/8" | 9,50 | 90,15 |
| N°4 | 4,75 | 79,31 | N°4 | 4,75 | 78,58 |
| N°10 | 2,00 | 68,97 | N°10 | 2,00 | 67,80 |
| N°40 | 0,425 | 57,30 | N°40 | 0,425 | 55,20 |
| N°200 | 0,075 | 48,16 | N°200 | 0,075 | 45,77 |

Podemos observar que los resultados obtenidos para ambas granulometrías son similares por tanto el ensayo fue bien realizado, se utilizara ambos para realizar la clasificación del tipo de suelo. (Cálculos completos Ver ANEXOS 1. Planillas de Cálculo del Análisis Granulométrico).

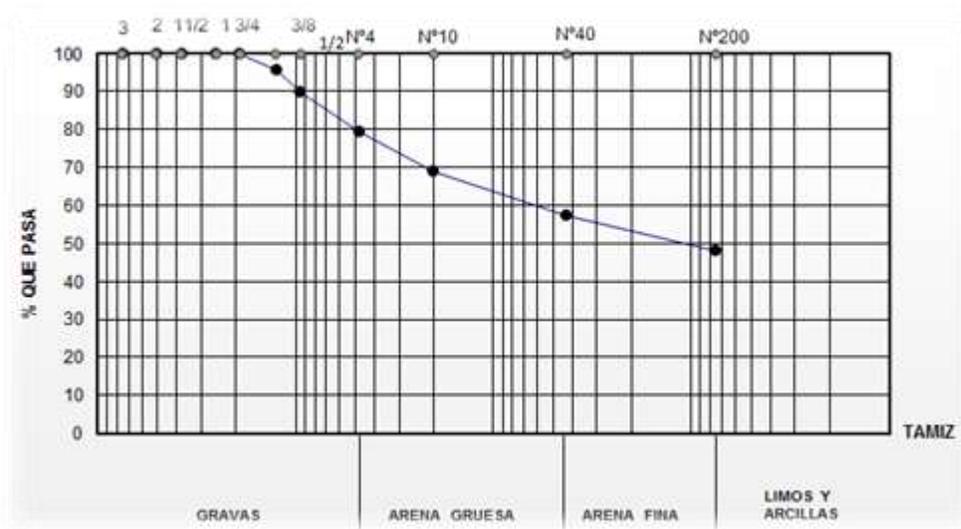


Figura 3.26 Curva Granulométrica del Suelo Utilizado

3.7.2. Límites de Atterberg

Los suelos cohesivos según su naturaleza y cantidad de agua que contienen, pueden presentar propiedades que los incluyan en estado sólido, semi-sólido, plástico o semi-líquido. El contenido de humedad límite al que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro. El método utilizado para medir estos límites de consistencia, se conoce como Método de Atterberg y los contenidos de agua con los cuales se producen los cambios de estado se denominan Límites de Atterberg.

Los límites de Atterberg se determinan en laboratorio mediante los procedimientos indicados en la Norma ASTM D 4318-00, estos son el límite líquido y límite plástico.

Los límites líquido y plástico son determinados por medio de pruebas de laboratorio relativamente simples que proporcionan información sobre la naturaleza de los suelos. Las pruebas son usadas ampliamente por ingenieros para la identificación del mismo, utilizando la Carta de plasticidad (Ver figura 3.27).

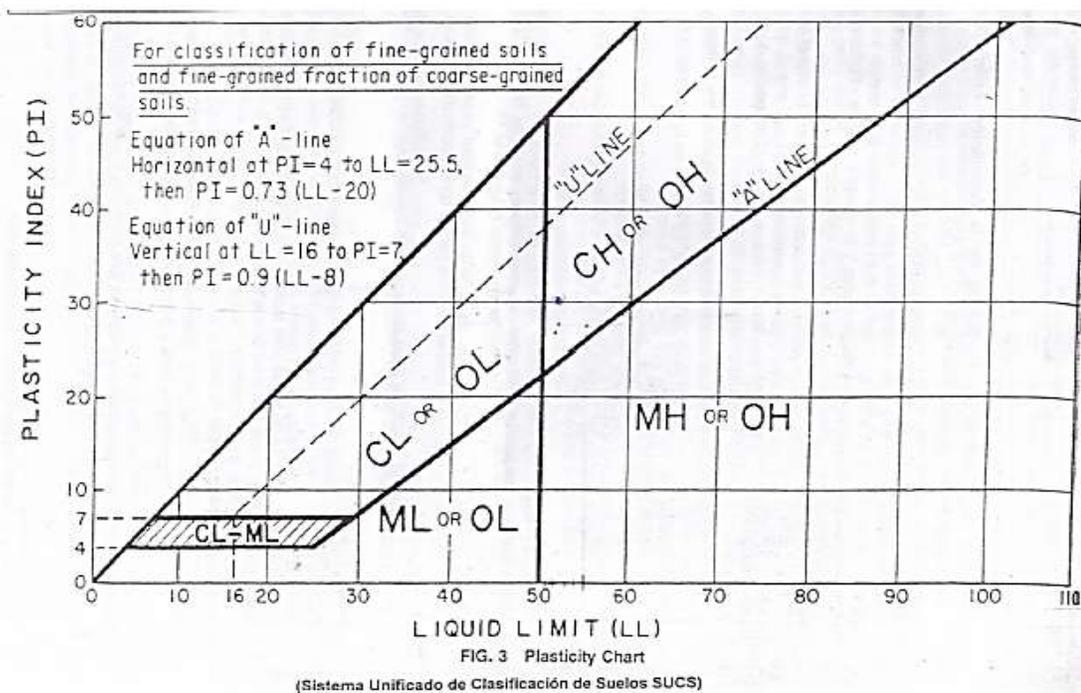


Figura 3.27 Carta de Plasticidad

Nota: Los límites de Atterberg que se grafican en el área sombreada son clasificaciones de frontera

Por lo que además del ensayo de granulometría del suelo, es necesaria la determinación de los límites de atterberg para poder tener una clasificación del suelo con propósitos de ingeniería adecuada. Para clasificar el suelo adecuadamente fue necesario específicamente determinar los límites líquido y plástico del suelo, La norma utilizada para la determinación de dichos límites, como ya fue mencionado, es la ASTM D 4318-00.

Límite Líquido.

El procedimiento utilizado para la determinación del límite líquido, fue de acuerdo a la norma ASTM D 4318-00 como se describe a continuación:

Se tomó una porción de suelo de aproximadamente 200 gr. (de acuerdo a ASTM D 4318-00 de 150 a 200 gr.) de suelo que pasaba por el tamiz N 40, separando una porción de esta muestra y se colocó en una cápsula de porcelana y se amaso y agregó agua hasta formar una masa pastosa con ligero brillo, luego se colocó una porción en la copa de Casa Grande de tal manera que la parte más gruesa alcanzara una profundidad de aproximadamente 10 mm (fig. 3.28 y 3.29).



Figura 3.28 Colocación de la muestra en la copa de Casagrande



a) Vista en Planta

b) Vista Frontal

Figura 3.29 Copa de Casagrande con la muestra de Suelo

Posteriormente con el ranurador se hizo un canal en el centro de la masa de suelo Fig. 3.30, y luego se comenzó a girar la manivela de la copa dejándola caer, a una velocidad de 2 caídas por segundo aproximadamente, hasta que las dos mitades de la masa de suelo, se unieran en una longitud de aproximadamente 13 mm. Es de importancia mencionar que la cantidad de suelo tomada era suficiente para poder hacer las diferentes pruebas hasta llegar a tener números de golpes que estuvieran en los intervalos de 25-35, 20-30, 15-25 golpes.



Figura 3.30 Utilización del Ranurador ASTM

Limite Plástico.

El procedimiento utilizado para la determinación del límite plástico, en resumen, fue el siguiente:

Se tomó una porción de suelo de 20 gr. del mismo material que se utilizó para la determinación del límite se adiciono agua hasta formar una pasta, se colocó sobre un vidrio y se rodó hasta formar un cilindro de aproximadamente 3mm de diámetro en un tiempo no superior de 2 minutos, debido a que no se fragmentaba el cilindro, se repitió el procedimiento varias veces.



Figura 3.31 cilindros de diámetro aproximado de 3 mm

A continuación se presentan en la tabla 3.26 los resultados que se obtuvieron mediante el ensayo de la determinación de los Límites de Atterberg, realizado en 2 ocasiones para corroborar que haya similitud entre los resultados y mayor confiabilidad de los mismos:

Tabla 3.26 Resumen de los Límites de Atterberg para el mismo Suelo

| LIMITES ATTERBERG 1 | LIMITES ATTERBERG 2 |
|----------------------------|----------------------------|
| Límite Líquido (LL) | Límite Líquido (LL) |
| 27 | 26 |
| Límite Plástico (LP) | Límite Plástico (LP) |
| 20 | 17 |
| Índice de plasticidad (IP) | Índice de plasticidad (IP) |
| 7 | 9 |
| Índice de Grupo (IG) | Índice de Grupo (IG) |
| 3 | 2 |

Podemos observar que los resultados obtenidos para ambos ensayos son similares por tanto el ensayo fue bien realizado, se utilizara ambos para realizar la clasificación del tipo de suelo. (Cálculos completos Ver Anexos 2. Planilla de Cálculos de los Límites de Atterberg).

3.7.3. Contenido de Humedad y Clasificación del Suelo

El contenido de humedad del material se define como la relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua que llena los poros o “agua libre”, en una masa de material, y la masa de las partículas sólidas de material. El procedimiento utilizado para la determinación del contenido de Humedad, fue de acuerdo a la norma ASTM D 2216. A continuación se presenta la tabla de resultados:

Tabla 3.27 Contenido de humedad del suelo

| CONTENIDO DE HUMEDAD (%) | | |
|--------------------------|------|------|
| 1 | 2 | 3 |
| 2,16 | 3,22 | 2,84 |
| PROMEDIO | | |
| 2,74 | | |

Con la granulometría del suelo y con el resultado de los límites de consistencia se determinó la clasificación del suelo de acuerdo a AASHTO Y ASTM concluyendo que el suelo utilizado es un **A-4** o una **ARENA ARCILLOSA CON GRAVA** (SC por sus siglas en inglés) respectivamente. Como se especifica con la siguiente tabla:

Tabla 3.28 Clasificación del Tipo de Suelo según “SUCS” y “AASHTO”

| | |
|--------------------------------|---|
| CLASIFICACIÓN DEL SUELO | <p style="text-align: center;">SUCS: " SC "</p> <p style="text-align: center;">AASHTO: " A - 4 "</p> |
| DESCRIPCIÓN | <p style="text-align: center;">Son Arenas Finas conteniendo Limos y Arcillas no Plásticos, algunas veces pueden contener poca Grava y Arena Gruesa.</p> <p style="text-align: center;">> = 15 % de Grava</p> <p style="text-align: center;"><i>Arena Arcillosa con Grava</i></p> |

Cálculos completos Ver Anexos 3. Planilla de Cálculos del Contenido de humedad y clasificación de suelos.

3.8. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO PARA PROPÓSITOS DE INGENIERÍA

3.8.1. Ensayo de Finura del cemento

El presente ensayo tiene como objetivo determinar la finura del cemento mediante la vía mecánica, es decir con el uso de tamices (vía seca y húmeda).

La fineza del cemento influye en el calor de hidratación liberado y en la velocidad de hidratación. A mayor finura del cemento, mayor rapidez de hidratación del cemento y por lo tanto mayor desarrollo de resistencia.

La relación que se utiliza para determinar el porcentaje de finura es la siguiente:

SI él %F es menor al 5%, significa que este es un cemento Portland de endurecimiento rápido.

Si él %F es menor que el 10% es que es un cemento Portland para uso ordinario.

El procedimiento utilizado para la determinación de la finura del cemento según REFERENCIA ASTM C 430, en resumen, fue el siguiente:

Preparamos la muestra de la misma manera que en la vía seca, una vez pesados los 50 gramos es mucho más cómodo no usar ya el tamiz Nro 50.

Introducimos los 50 gramos de cemento en el tamiz Nro 200, con un recipiente por debajo.

Se va vertiendo agua por un cierto tiempo sobre la muestra en el tamiz como escurriendo, hasta que ya no salga ni una partícula de cemento por la parte inferior del tamiz.

Extraemos el cemento retenido en el tamiz y la dejamos secar en un recipiente.

Finalmente procedemos a pesar esta muestra seca y fría.

A continuación se presentan en la tabla 3.29 los resultados que se obtuvieron mediante el ensayo de la determinación de la finura del cemento, realizado en 5 ocasiones para corroborar que haya similitud entre los resultados y mayor confiabilidad de los mismos:

Tabla 3.29 Resultados Finura del Cemento

| CEMENTO "EL PUENTE" FABRICA SOBOCE | |
|---------------------------------------|-------------------|
| Re [200] % | Re [200] MEDIA |
| 1,58 | 1,57 |
| 1,52 | |
| 1,58 | |
| 1,54 | |
| 1,62 | |

Podemos observar que los resultados obtenidos para los 5 ensayos son similares por tanto el ensayo fue bien realizado, como ya se mencionó anteriormente este tipo de cemento es menor al 5%, por lo tanto significa que este es un cemento Portland de endurecimiento rápido. (Cálculos completos Ver Anexos 4. Planilla de Cálculos de la Finura del Cemento).

3.8.2. Peso específico del Cemento

El presente ensayo tiene como objeto fundamental determinar el peso específico del cemento mediante el frasco volumétrico de Le Chatelier.

El peso específico real varía muy poco de unos cementos a otros, oscilando entre 2.9 y 3.15 (gr/cm³). La limitación, establecida por algunas normas (igual o superior a 3) se cumple prácticamente siempre. La determinación del peso específico relativo de los cementos consiste en establecer la relación entre una masa de cemento (gr) y el volumen (ml) de líquido que esta masa desplaza en el matraz de Le Chatelier.

El procedimiento utilizado para la determinación del peso específico del cemento según REFERENCIA NB 064, en resumen, fue el siguiente:

Primeramente se tomó una muestra del cemento a ensayar, la norma indica que se debe secar la muestra en un horno a 105 °C, posteriormente pesamos 64 gramos de cemento. Introducimos en el frasco de Le Chatelier el kerosene con la ayuda de un embudo de vidrio, la norma indica usar cualquier líquido cuya densidad sea menor a 1 (gr/cm³), la cantidad de kerosene debe estar entre 0 a 1 ml.

Previamente dejamos calentando agua en un recipiente hasta que alcance temperaturas entre 20 y 27 °C, una vez alcanza la temperatura deseada introducimos el frasco de Le Chatelier en Baño María en el agua que tenemos ya en la temperatura deseada con el fin de estabilizar la temperatura y por ende el volumen del kerosene por un lapso de 5 minutos.

Tomamos la temperatura del kerosene y la registramos como la temperatura, al igual que el volumen que debe estar entre 0 y 1 ml, este ha de ser el volumen inicial.

Introducimos la muestra del cemento en el frasco teniendo máximo cuidado en no perder o dejar caer parte de la muestra fuera del frasco.

Una vez introducido el cemento en el frasco inclinamos el frasco 45° y la hacemos girar con el fin de llenar los vacíos y sacar el aire que podría contener la muestra.

Nuevamente introducimos el frasco en el baño maría donde la dejamos por un momento para estabilizar nuevamente su temperatura que no debe variar más de 1°C de la temperatura inicial. Tomamos la temperatura de la muestra con kerosene y si no varía más de 1°C, entonces esa es la temperatura final, en ese mismo momento tomamos la lectura del volumen final.

A continuación se presentan en la tabla 3.30 los resultados que se obtuvieron mediante el ensayo de la determinación del peso específico del cemento, realizado en 3 ocasiones para corroborar que haya similitud entre los resultados y mayor confiabilidad de los mismos:

Tabla 3.30 Resultados Peso Específico del Cemento

| CEMENTO EL PUENTE (SOBOCE) | |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| PE (gr/cm ³) | PE-MEDIA (gr/cm ³) |
| 3,14 | 3,14 |
| 3,15 | |
| 3,14 | |

Podemos observar que los resultados obtenidos para los 3 ensayos son similares por tanto el ensayo fue bien realizado, el peso específico de un cemento ideal es 3.15 (gr/cm³) podemos observar que estamos muy cerca de ese valor por tanto cumple con las normas mínimas para poder ser utilizado en la construcción. (Cálculos completos Ver Anexos 5. Planilla de Cálculos del Peso Específico del Cemento).

4. CAPÍTULO N°4: DISEÑO DE PRUEBA

4.1. COMPACTACIÓN DE ACUERDO A NORMA AASTHO T -180

La compactación de materiales sueltos (suelos, materiales granulares, mezclas de suelo con algún estabilizador, etc.) es una práctica común en los proyectos de ingeniería. La compactación incrementa las características de resistencia de los suelos, aumentando así la capacidad de carga de estos, al mismo tiempo disminuye la cantidad de asentamientos indeseables de las estructuras, además incrementa la estabilidad de los taludes, bases o subbases de estructuras de pavimentos.

Para el control de calidad de capas de suelo cemento compactado, tradicionalmente se ha utilizado la norma AASHTO T 134-03 (ASTM D 558-96), pero para el desarrollo de la investigación se utilizará la energía de compactación de la norma AASHTO T 180 (ASTM D 1557) cuyo procedimiento es similar, pero la energía de compactación es mayor a la que proporciona AASHTO T 134. El alcance de la norma AASHTO T 180, es aplicable para la determinación de la relación humedad-densidad de suelos únicamente, pero debido a que esta proporciona mayor energía de compactación, hoy en día es utilizada también para mezclas de suelo cemento ya que la energía de compactación proporcionada es compatible y representativa a las compactaciones de campo realizadas con los equipos modernos de compactación, que muchas veces tienen la capacidad de alcanzar porcentajes de compactación superiores al 100% respecto a densidades máximas obtenidas mediante AASHTO T-134, ante esta discrepancia se ha optado por asumir el cambio en la norma para el control de capas de suelo cemento compactado.

Antes de realizar las probetas, es necesario conocer la humedad presente en la mezcla de suelo cemento a la cual se debe compactar (humedad óptima), para alcanzar el máximo grado de compactación posible (densidad máxima) de las probetas de prueba. Para ello y en coherencia a lo expuesto anteriormente, se procederá según la norma AASHTO T 180.

Como primer paso, se realizará el ensayo proctor al suelo a utilizar en la mezcla para obtener un valor estimado de humedad óptima y densidad máxima, que se espera que

para las mezclas de suelo cemento dichos parámetros no varíen significativamente por las mínimas cantidades de cemento contenido en las mezclas, al mismo tiempo se podrá observar el comportamiento de las diferentes mezclas respecto al suelo ante la adición y variación de la cantidad de cemento.

El segundo paso es determinar la humedad óptima y la densidad máxima que alcanzan las diferentes mezclas de suelo cemento compactado, datos necesarios para garantizar que las probetas de suelo cemento posean el mayor peso volumétrico seco posible.

El principio físico del ensayo es el hecho de que el grado de compactación de un determinado suelo depende directamente de la energía de compactación y de la humedad (cantidad de agua por unidad de peso de suelo) presente en el suelo a compactar. El ensayo proctor consiste en generar una serie de probetas compactados de volumen conocido y energía de compactación constante cuya humedad es controlada, con el fin de conocer el peso volumétrico seco de cada espécimen. El contenido de agua de cada espécimen es variado intencionalmente con el objeto de obtener una nube de puntos que relacionen la humedad y el peso volumétrico seco para cada uno de los especímenes (ver fig. 4.32), esta nube de puntos forma la curva de compactación o curva Proctor, la cual, mediante su tendencia, proporciona el “peso volumétrico seco máximo” y la humedad correspondiente a este es la “humedad óptima” (fig. 4.33), que en otras palabras es la humedad necesaria en el suelo para poder alcanzar el máximo grado de compactación.

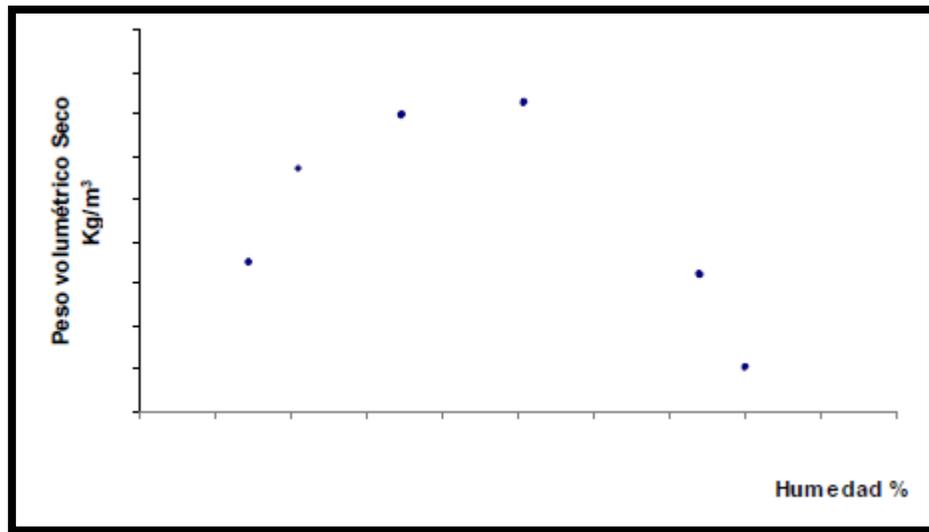


Figura 4.32 Diagrama de Dispersión Relación Humedad – Densidad

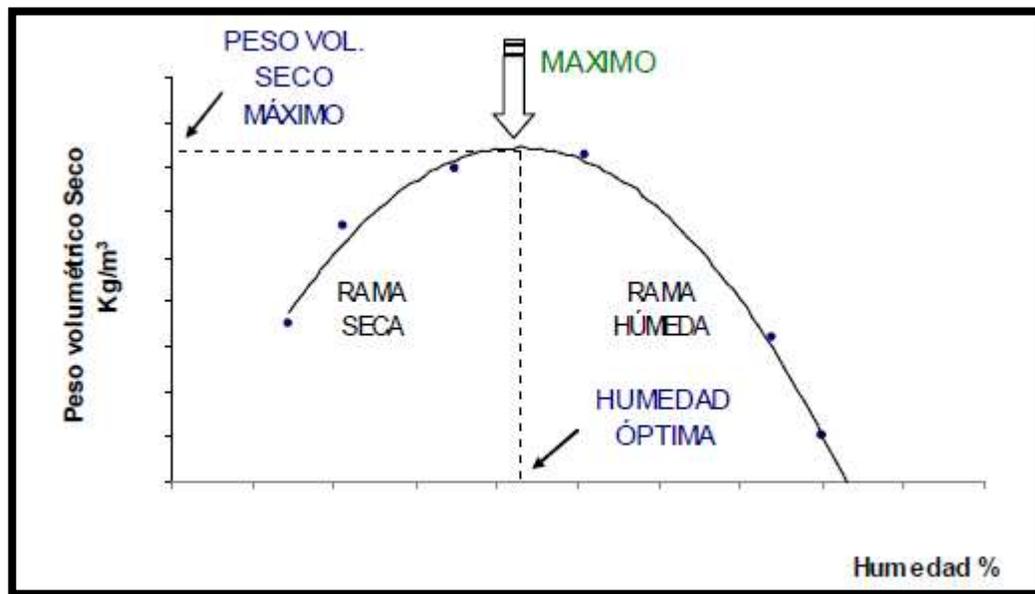


Figura 4.33 Curva de compactación

4.1.1. Obtención de la Humedad Óptima – Densidad Máxima para Suelo Puro

El procedimiento a utilizar según la norma AASHTO T 180, depende de las características granulométricas del material a utilizar, y para ello plantea cuatro métodos que se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4.31 Procedimientos alternativos para realizar el ensayo Proctor.**Fuente: Norma AASTHO T-180**

| Especificación | Método A | Método B | Método C | Método D |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Malla que pasa el material | 4 | 4 | 3/4 | 3/4 |
| Porcentaje máximo Retenido en malla. | 40 % | | 30 % | |
| Diámetro del molde (pulg.) | 4 | 6 | 4 | 6 |
| No. De capas | 5 | 5 | 5 | 5 |
| No. De golpes por capa | 25 | 56 | 25 | 56 |
| Volumen del molde (pie ³) | 1/30 | 1/13.33 | 1/30 | 1/13.33 |
| Energía de Compactación Lb-pie/pie ³ (kN.m/m ³) | 56,000 (2,700) | 56,000 (2,700) | 56,000 (2,700) | 56,000 (2,700) |

De la tabla anterior se puede concluir que en base a las características granulométricas del material (ver tabla 4.32), el método a utilizar es el método C, el cual utiliza un molde de 6" de diámetro, un volumen de 1/13.33 pie³ (fig. 4.34) y proporciona una energía de compactación de 56,000 Lbs-pie/pie³ (2,700 kN.m/m³) realizando cilindros elaborados en 5 capas, cada una de ellas compactadas con 56 golpes con un martillo de 10 lb (4.54 Kg) y una altura de caída de martillo de 18 pulg. (45.7 cm), además es acorde a la energía de compactación y tamaño de molde utilizado por el método C de la norma ASTM D 1633-96.

Tabla 4.32 Resumen de la Granulometría

| GRANULOMETRÍA | | |
|---------------|-------------|----------------------|
| Tamices | Tamaño (mm) | % Que Pasa del Total |
| 1/2" | 12,50 | 95,40 |
| 3/8" | 9,50 | 89,91 |
| Nº4 | 4,75 | 79,31 |
| Nº10 | 2,00 | 68,97 |
| Nº40 | 0,425 | 57,30 |
| Nº200 | 0,075 | 48,16 |

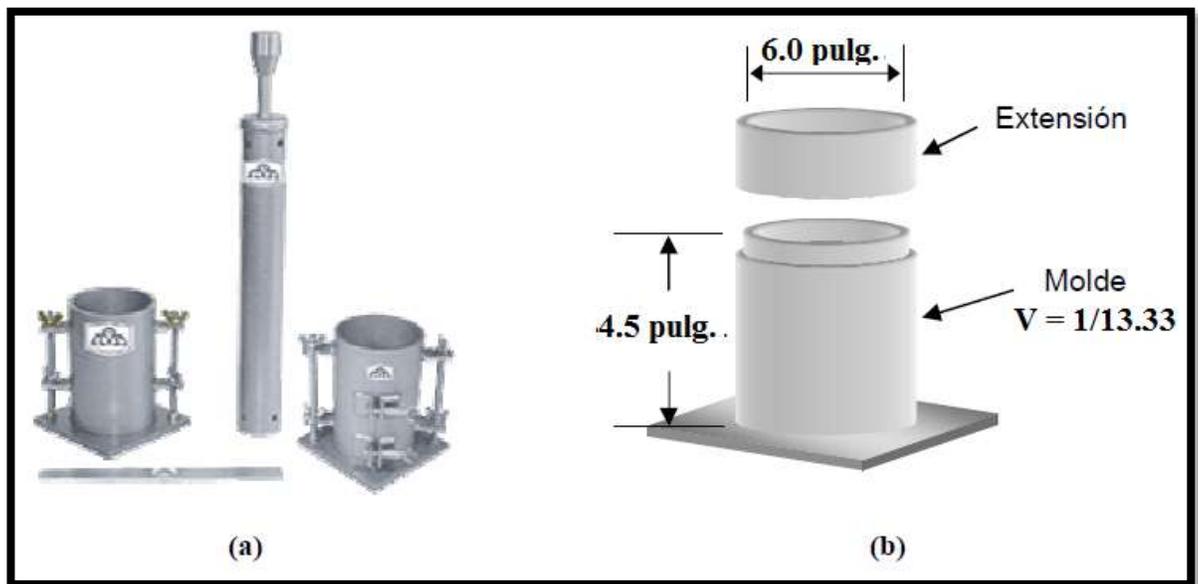


Figura 4.34 (a) Molde y Martillo utilizado en el ensayo Proctor. (b) Dimensiones del molde utilizado en el método C del ensayo Proctor

Según la norma si se tiene más del 5% en masa de partículas de sobre tamaños (material retenido en la malla 4 o $\frac{3}{4}$, según el método utilizado), deben realizarse correcciones según lo indica la norma AASHTO T 224-01.

Para la Arena – Arcillosa utilizada en el trabajo de investigación se tiene el resultado de la gráfica de la relación Humedad – Densidad, mostrada en la figura 4.35.

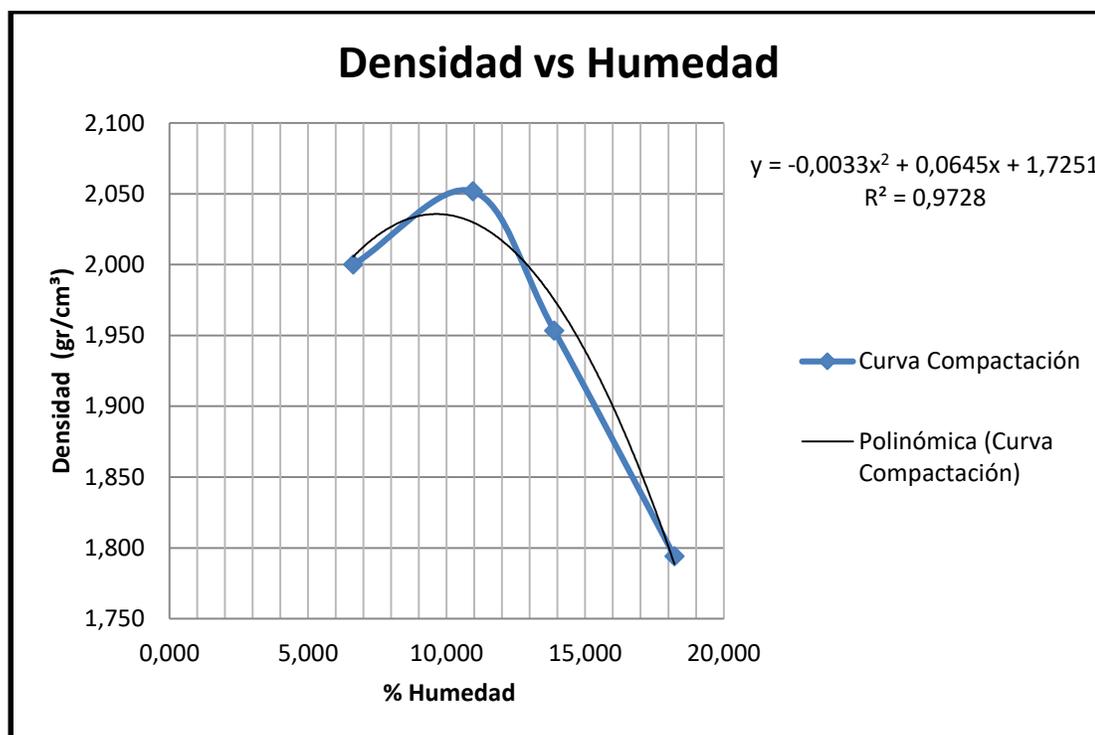


Figura 4.35 Curva de Compactación para la Arena Arcillosa

De la curva de compactación se obtiene que el peso volumétrico seco máximo es de **2,040 gr/cm³** y la humedad óptima es de **9.77 %**. (Cálculo completo Ver Anexo 6 Planilla de Cálculo de Relación Humedad – Densidad compactación T – 180).

4.1.2. Obtención de la Humedad Óptima – Densidad Máxima para Suelo Cemento Dosificación del 3%

De forma similar al procedimiento del ensayo proctor para suelo, se procedió a realizar el ensayo a las diferentes mezclas de suelo cemento, pero teniendo en consideración que la mezcla contiene cemento, por lo que la compactación se debe realizar en el menor tiempo posible para garantizar un adecuado proceso de hidratación del cemento.

Para la Humedad Óptima – Densidad Máxima del Suelo Cemento a una Dosificación del 3%. Se tiene el resultado de la gráfica de la relación Humedad – Densidad, mostrada en la figura 4.36.

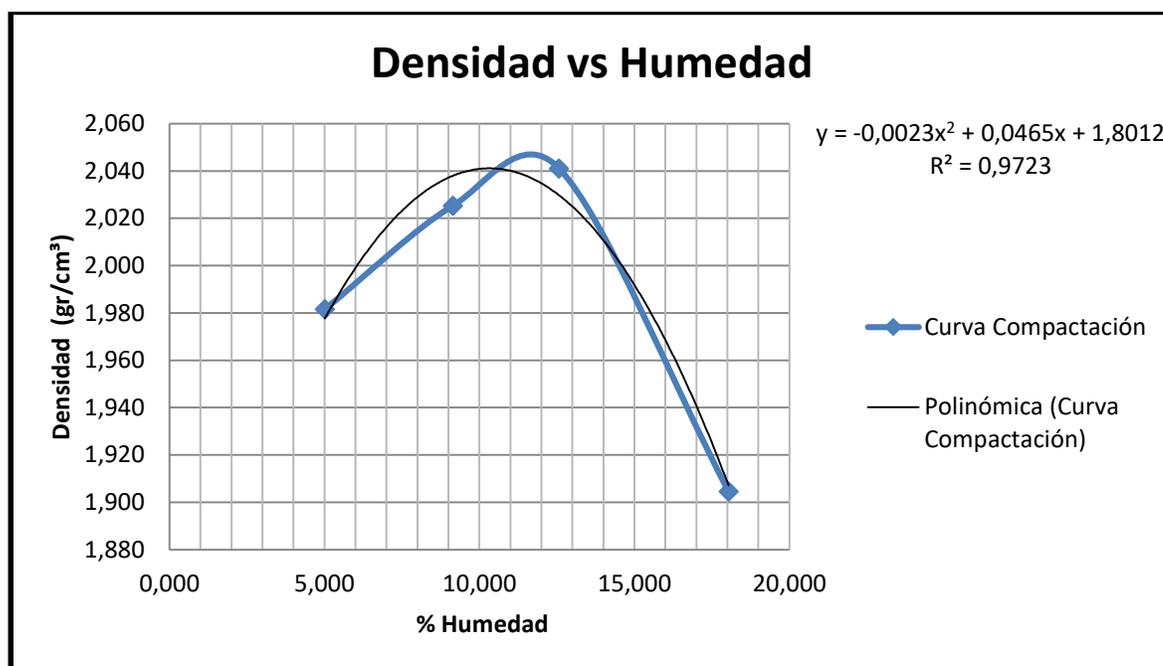


Figura 4.36 Curva de Compactación para Suelo – Cemento a una Dosificación del 3%

De la curva de compactación se obtiene que el peso volumétrico seco máximo es de **2,036 gr/cm³** y la humedad óptima es de **10,11 %**. (Cálculo completo Ver Anexo 6 Planilla de Cálculo de Relación Humedad – Densidad compactación T – 180).

4.1.3. Obtención de la Humedad Óptima – Densidad Máxima para Suelo Cemento Dosificación del 6%

Para la Humedad Óptima – Densidad Máxima del Suelo Cemento a una Dosificación del 6%. Se tiene el resultado de la gráfica de la relación Humedad – Densidad, mostrada en la figura 4.37.

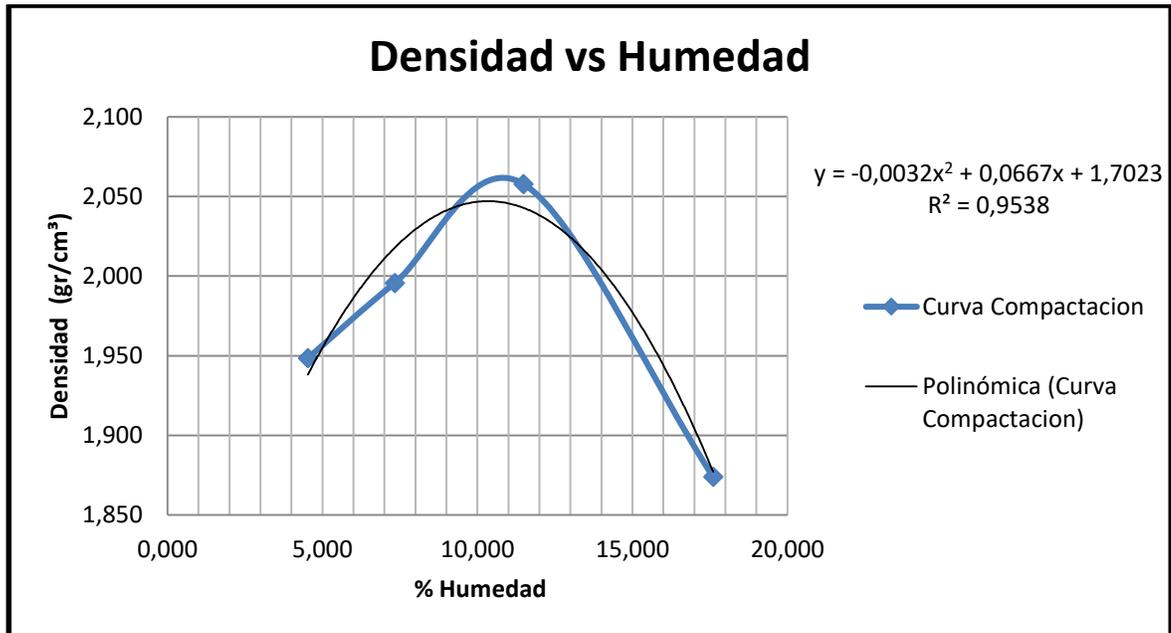


Figura 4.37 Curva de Compactación para Suelo – Cemento a una Dosificación del 6%

De la curva de compactación se obtiene que el peso volumétrico seco máximo es de **2,042 gr/cm³** y la humedad óptima es de **10.42 %**. (Calculo completo Ver Anexo 6 Planilla de Cálculo de Relación Humedad – Densidad compactación T – 180).

4.1.4. Obtención de la Humedad Óptima – Densidad Máxima para Suelo Cemento Dosificación del 9%

Para la Humedad Óptima – Densidad Máxima del Suelo Cemento a una Dosificación del 9%. Se tiene el resultado de la gráfica de la relación Humedad – Densidad, mostrada en la figura 4.38.

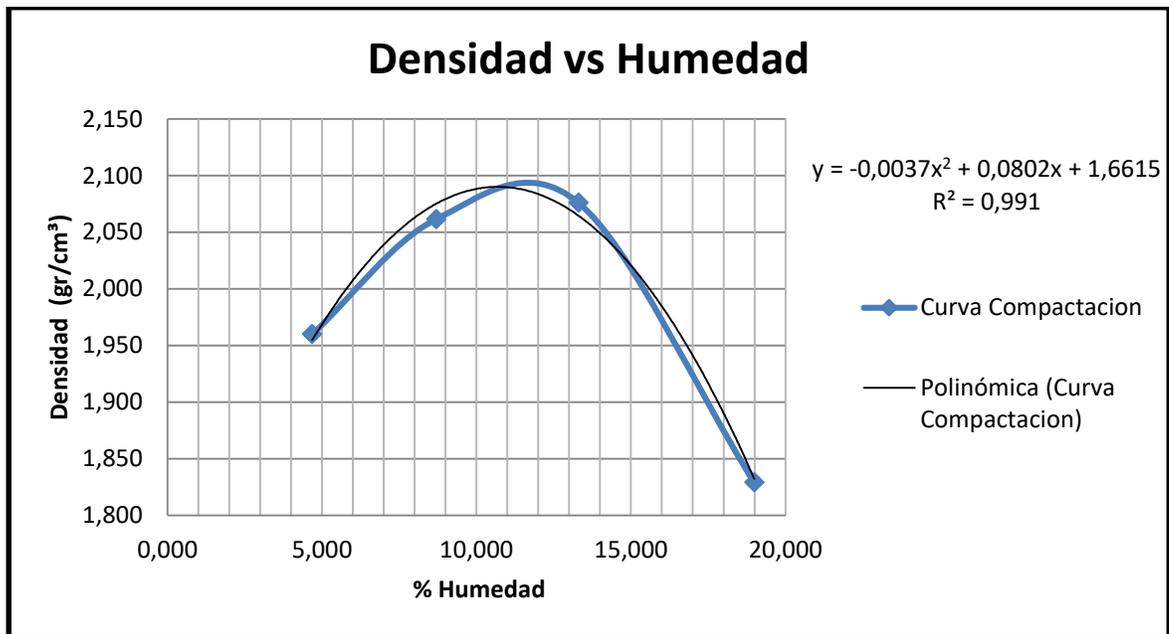


Figura 4.38 Curva de Compactación para Suelo – Cemento a una Dosificación del 9%

De la curva de compactación se obtiene que el peso volumétrico seco máximo es de **2,096 gr/cm³** y la humedad óptima es de **10.84 %**. (Calculo completo Ver Anexo 6 Planilla de Cálculo de Relación Humedad – Densidad compactación T – 180).

4.1.5. Obtención de la Humedad Óptima – Densidad Máxima para Suelo Cemento Dosificación del 12%

Para la Humedad Óptima – Densidad Máxima del Suelo Cemento a una Dosificación del 12%. Se tiene el resultado de la gráfica de la relación Humedad – Densidad, mostrada en la figura 4.39.

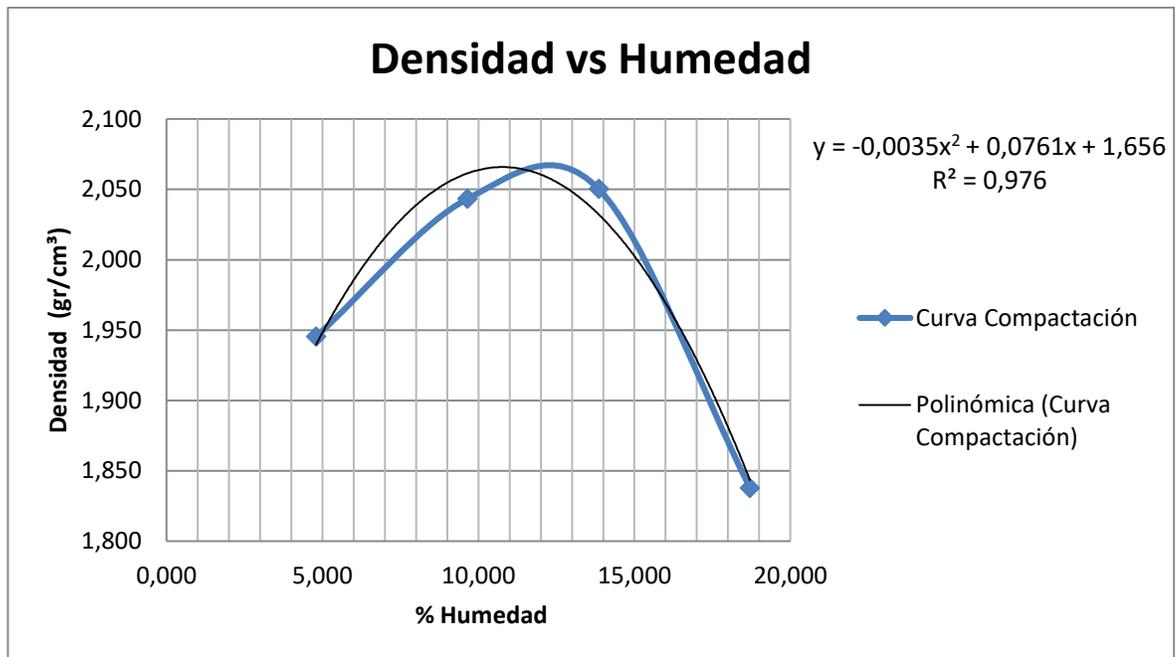


Figura 4.39 Curva de Compactación para Suelo – Cemento a una Dosificación del 12%

De la curva de compactación se obtiene que el peso volumétrico seco máximo es de **2,070 gr/cm³** y la humedad óptima es de **10,87 %**. (Cálculo completo Ver Anexo 6 Planilla de Cálculo de Relación Humedad – Densidad compactación T – 180).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.40 (a) Material retenido en el tamiz 3/4" que se desechara. (b) Peso del suelo antes de la dosificación. (c) Peso del molde + muestra después de compactarlo. (d) Peso de las taras del material seco después del secado al horno

4.2. ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS DE PRUEBA

La elaboración de las Probetas se hará acorde a la norma ASTM D 1632-96, la cual comprende el procedimiento de elaboración y curado de las probetas de suelo cemento para compresión y flexión, la cual utiliza moldes de 2.8 pulg. (71.1 mm) de diámetro y 5.6 pulg. (142.2 mm) de altura (relación altura-diámetro de 2), pero permite utilizar moldes de diferentes tamaños:

Los especímenes para la prueba de compresión serán cilindros con una longitud igual a dos veces el diámetro. Este método mantiene especímenes de 2.8 in. (71 mm) de diámetro y de 5.6 in. (142 mm) de longitud, pero puede usarse el mismo procedimiento para realizar especímenes más grandes o más pequeños. (Nota: Norma ASTM D 1632, sección 8).

Esto nos remite a la norma ASTM D 1633-96 (Método estándar para compresión de cilindros de suelo cemento), la cual permite utilizar moldes de 6.0 pulg. (149.5 mm) de diámetro y de 4.5 pulg. (114.0 mm) de altura (Método C), por lo que las probetas serán realizadas mediante este método.

La energía de compactación a ser utilizada será la misma utilizada en la realización del ensayo proctor a cada una de las mezclas de suelo cemento (56000Lbpie/ pie³), por lo que se utilizara el martillo de 10 lb. y una altura de caída de 18 pulg. Para proporcionar la energía de compactación de AASHTO T180.

El equipo a utilizar en la realización de las probetas es el mismo utilizado para la realización del ensayo proctor. El procedimiento para la elaboración de las probetas será conforme a la norma ASTM D 1632, que es muy similar a AASHTO T 180 (ASTM D 1557) y AASHTO T 134 (ASTM D 558).

A continuación se describe el procedimiento de elaboración de las probetas de suelo cemento.

Componentes de la Mezcla.

La mezcla de suelo cemento está compuesta básicamente de suelo, cemento y agua en cantidades controladas. Según ASTM D 1632 estas cantidades deben de basarse en los

resultados obtenidos de ASTM D 558. El suelo a utilizar no debe de tener exceso de humedad y debe ser fácilmente desmenuzable, de lo contrario hay que secarlo al aire o mediante un aparato de secado que no exceda los 60 °C, una vez cumplido este requerimiento, el suelo debe ser tamizado por la malla No. 3/4, y se debe preparar una cantidad mínima de 6 Kg. (según ASTM D 558) para cada espécimen, se recomienda almacenar el material en bolsas plásticas para evitar la pérdida de humedad, ver fig.4.41.



(a)



(b)

Figura 4.41 (a) y (b) Pesado y almacenamiento del suelo para la elaboración de la Mezcla

Para conocer la cantidad de cemento y agua a utilizar, es necesario conocer la masa seca de suelo, por lo que es preciso conocer la humedad presente en el suelo (la norma recomienda utilizar el método de secado en horno ASTM D2216). Una vez conocido el peso de suelo seco se procede a calcular la cantidad de cemento a agregar, para el porcentaje de cemento en peso seco deseado. La norma específica encontrar la masa de cemento con 1 gr. de precisión, aunque por las mínimas cantidades utilizadas para la realización de los especímenes se determinaron las cantidades de cemento en la balanza de 0.01 gr.

Dosificación en función del Peso de la Muestra, por ejemplo para una Dosificación del 3%

$$W_{\text{cemento}} = W_{\text{suelo}} * \frac{\text{Dosificación}(3\%)}{100}$$

Dónde:

W_{cemento} = Peso del Cemento para la Dosificación del 3%

W_{suelo} = Peso del Suelo que es 6 000 gr

Entonces la Dosificación quedaría en porcentajes de: 97% = 5 820gr. de Suelo (Arena – Arcillosa), y 3% = 180 gr. de Cemento, para hacer un total de 6 000 gr.

El agua agregada a la mezcla es la diferencia entre el contenido de agua que genera la humedad óptima de la mezcla y el contenido de agua contenido en el suelo, y es fácilmente calculada mediante la siguiente expresión:

$$\text{Agua a Agregar} = (W_{\text{suelo}} + W_{\text{cemento}}) * \frac{(W_2 - W_1)}{(1 + W_1)}$$

Dónde:

$(W_{\text{suelo}} + W_{\text{cemento}})$ = Peso de la muestra de suelo más el peso del cemento agregado.

W_1 = Contenido de humedad presente en el suelo.

W_2 = Contenido de humedad óptimo.

Mezclado.

La norma permite realizar el mezclado a mano o en equipo de mezclado de laboratorio, cuando la mezcla es elaborada a mano, esta debe ser elaborada en un recipiente limpio, no absorbente y húmedo, en una charola de metal o en un tablero de acero se forma una especie de volcancito si el término lo avala, ver fig. 4.42.



(a)

(b)

Figura 4.42 (a) Preparación del suelo antes de la Mezcla. (b) Muestra con el porcentaje de cemento calculado según el tipo de Dosificación

El procedimiento a seguir es el siguiente:

Primero se debe mezclar el suelo y el cemento hasta obtener una mezcla de color uniforme, posteriormente agregar el agua previamente calculada y mezclar hasta obtener una mezcla homogénea y sin grumos ver Fig. 4.43 La norma AASHTO T 134, recomienda dejar reposar la mezcla de suelo cemento antes de la compactación, durante un periodo de entre 5 y 10 min. Para permitir la distribución de la humedad.

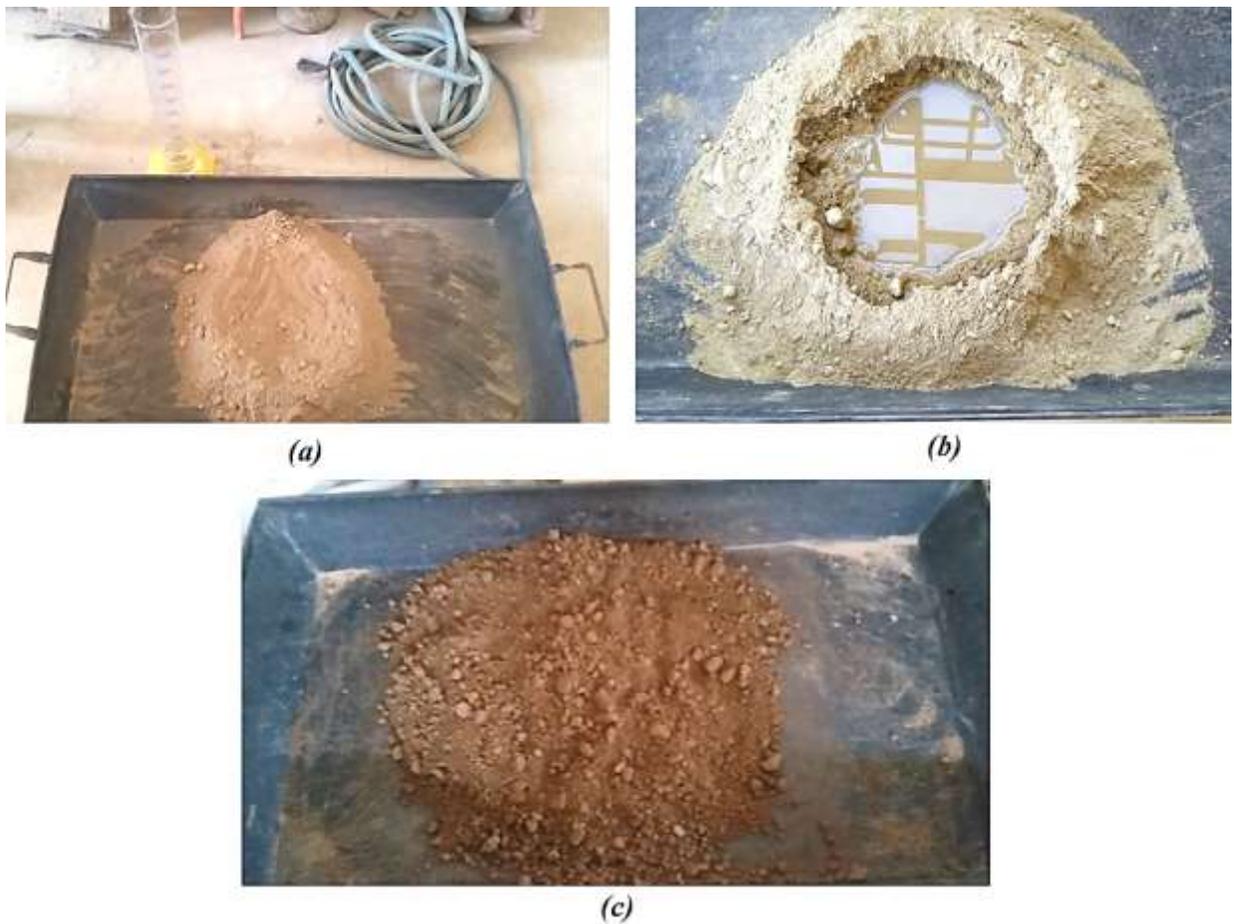


Figura 4.43 (a) Suelo mezclado con cemento. (b) Adición de agua a la mezcla de suelo cemento. (c) Mezcla lista para la compactación

Compactación del cilindro.

Para la compactación de los cilindros se utiliza el equipo utilizado en el ensayo proctor según AASHTO T 180, método C: molde de 6" de diámetro y 4.5" de altura, con su respectiva extensión collarín, martillo de 10 lb con altura de caída de 18", regla enrazadora y demás misceláneos.

Una vez preparada la mezcla, el cilindro se elabora compactando la mezcla de suelo cemento dentro del molde previamente engrasado, en cinco capas, cada una

compactada con 56 golpes (con el martillo de 10 lb y 18" de altura de caída). Ver fig.4.44.



Figura 4.44 Elaboración de probetas de Suelo Cemento

Antes de colocar la capa siguiente es necesario escarificar la capa ya compactada para garantizar la adherencia entre capas y evitar planos de discontinuidad. La última capa no debe sobrepasar más de 1cm la altura del molde, sobre altura que posteriormente debe ser retirada utilizando la regla enrazadora (ver Fig. 4.45)

Cuando la superficie superior del cilindro es enrazada, difícilmente se obtendrá una superficie uniforme y lisa, este inconveniente es fácilmente resuelto espolvoreando la superficie con material pasado por el tamiz No. 10 o No. 40 (puede utilizarse el material sobrante de la elaboración de la probeta) y enrazarlo nuevamente.



Figura 4.45 Muestra lista para Enrasar

Hay que tener presente que la mezcla utilizada contiene cemento por lo tanto el procedimiento de mezclado y compactado de las probetas debe ser continuo y el tiempo entre el mezclado con agua y la compactación final no debe exceder 30 min.

Desmoldado de las probetas.

El desmoldado puede realizarse utilizando un extractor de muestras de pistón hidráulico teniendo cuidado de no dañar las probetas, especialmente las aristas que a esta edad aún son muy frágiles (ver fig. 4.46).

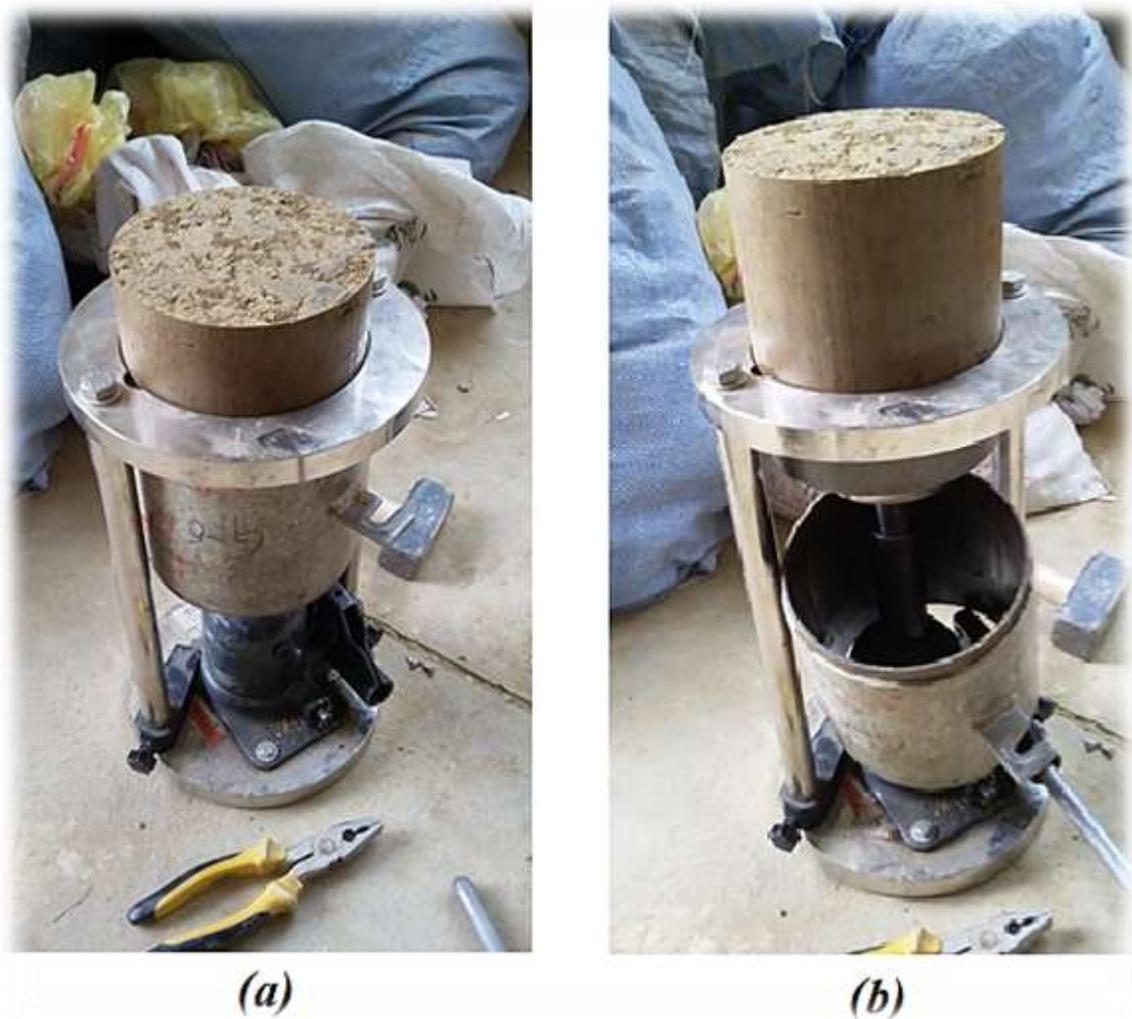


Figura 4.46 (a) y (b) Extracción de las probetas de Suelo – Cemento

Una vez extraídas las probetas es importante que estas no pierdan humedad por la evaporación del agua, para esto las cubrimos con papel húmedo y las colocamos en bolsas plásticas bien cerradas de manera que no entre aire, para realizar su posterior curado de las misma. Es importante identificar cada uno de las probetas para evitar confusiones durante su almacenamiento y su manipulación durante los ensayos posteriores (ver fig. 4.47).



Figura 4.47 (a) y (b) Confinamiento de las Probetas por medio de papel húmedo (c) Confinamiento sobre el papel húmedo con bolsas de plástico bien cerradas

4.3. CURADO DE LAS PROBETAS

Después de elaboradas las probetas, estas deben de someterse a un proceso de curado para asegurar la adecuada hidratación del cemento presente en la mezcla de suelo cemento. El curado inicial se realiza saturándolas por 12 horas, o más tiempo si se requiere, una vez saturadas se las vuelve a confinar con papel húmedo y en las bolsas de plástico bien cerradas y enumeradas de acuerdo a la nomenclatura asignada, (ver Figura 4.48). Este proceso se repite los 3 primeros días después de la extracción de las mismas.



Figura 4.48 (a) y (b) Curado de las Probetas de Suelo Cemento. (c) y (d) Confinamiento de las Probetas de Suelo Cemento

Posteriormente al curado de las Probetas de Suelo Cemento se almacenan las mismas en un ambiente cerrado, donde no estén expuestas al Sol, al Aire, y a ningún efecto climatológico que pudiera alterar sus propiedades, además también para que no pierdan

humedad y de esta manera se mantengan hidratadas hasta la fecha de ensayo (ver fig. 4.49).



Figura 4.49 (a) y (b) Almacenamiento de las Probetas de Suelo Cemento

4.4. ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

El método del ultrasonido en la ingeniería es utilizado para el ensayo de los materiales, es una técnica de ensayo no destructivo (Non destructive testing, NDT) y tiene diversas aplicaciones, en especial para conocer el interior de un material o sus componentes según la trayectoria de la propagación de las ondas sonoras, al procesar las señales de las ondas sonoras se conoce el comportamiento de las mismas durante su propagación en el interior del elemento y que dependen de las discontinuidades del material examinado, lo que permite evaluar aquella discontinuidad acerca de su forma, tamaño, orientación, debido que la discontinuidad opone resistencia (conocida como impedancia acústica) al paso de una onda.

El análisis de los materiales mediante ultrasonido se basa en el principio físico: El movimiento de una onda acústica, se sabe que la onda acústica es afectada por el medio a través del cual viaja y se distinguen los siguientes tipos: onda longitudinal, transversal y superficial (Rayleigh), debido a ello ocurren los cambios asociados con el paso de

una onda sonora de alta frecuencia a través de un material en uno o más de los cuatro parámetros siguientes: tiempo de tránsito, atenuación, reflexión y frecuencia.

Estos parámetros a menudo pueden estar correlacionados con los cambios de las propiedades físicas, dureza, módulo de elasticidad, densidad, homogeneidad, estructura.

La naturaleza ultrasónica es debido a que tienen frecuencias altas y longitudes de onda cortas, apropiadas para el ensayo de los materiales, para inspeccionar el interior de las piezas que ofrecen una trayectoria continua a la propagación de las ondas sonoras. Para generar onda ultrasónica, se utiliza un transductor piezoeléctrico que convierte las señales eléctricas en señales sonoras, y viceversa. El transductor consiste en un cristal (de cuarzo) piezoeléctrico insertado en un alojamiento a prueba de agua, que facilita su conexión eléctrica a un generador o transmisor-receptor de pulsos, en el modo de transmisión, se aplica al cristal un pulso de energía eléctrica de corta duración y alto voltaje, provocando que cambie rápidamente su configuración geométrica, deformándose, y emita un pulso de energía acústica (onda) de alta frecuencia. En el modo de recepción, cualquier onda ultrasónica o eco que regresen a través de la trayectoria acústica, la cual incluye los medios y partes de acoplamiento, comprimen el cristal, produciendo una señal eléctrica que se amplifica y se procesa en el receptor.

Parámetros a considerar.

Velocidad.

La velocidad del sonido es usualmente el parámetro ultrasónico más fácil de medir, en un medio homogéneo está directamente relacionado con el módulo de elasticidad, densidad del material, módulo de Poisson, y el grado de homogeneidad. Según el tipo de onda la velocidad también es diferente. La velocidad se relaciona con distancia en la que viaja, el tiempo, la longitud y frecuencia de onda de la siguiente manera:

$$V = \lambda * f \quad V = \frac{S}{t}$$

Dónde:

V= Velocidad

S= Distancia entre transductores

t= tiempo

λ = Longitud de onda

f= Frecuencia

La velocidad de las ondas también está influenciada por las propiedades de los materiales en el cual viajan. De lo mencionado el módulo de elasticidad está relacionado de la siguiente manera:

$$E_D = \frac{V^2 * Q * (1 + \nu) * (1 - 2 * \nu)}{1 - \nu}$$

Dónde:

E_D = Módulo de elasticidad dinámico (MN/m²)

V = Velocidad (km/s)

Q = Densidad del Suelo Cemento (Kg/m³)

ν = Coeficiente de Poisson.

Atenuación.

Es la reducción del nivel de una señal, cuando pasa a través de un elemento; la intensidad de la energía aplicada disminuye con el espesor del material, siendo amortiguada en tasas diferentes según tipo de material, la amortiguación se debe a los efectos interactivos de la densidad, dureza, viscosidad, y estructura molecular.

Dispersión.

Las ondas acústicas rebotan según el material que se examina. Los cambios son distintos dependiendo de la concentración, estructura, orientación de las fibras,

porosidad, tamaño de la partícula, y otras variaciones micro estructurales que afectan la amplitud, la dirección, y la frecuencia de las señales de onda. Los efectos de dispersión también pueden ser monitoreados indirectamente observando los cambios en la amplitud del eco o una señal de transmisión directa.

Frecuencia (el Espectro).

Todos los materiales tienden a actuar hasta cierto punto como un filtro al paso de la onda, atenuando o dispersándolo. Las ondas del sonido oscilan a una frecuencia específica, esto es, número de vibraciones o ciclos por segundo. El oído humano percibe un rango de frecuencias entre (20 Hz y 20 Khz.), mientras la mayoría de aplicaciones ultrasónicas utilizan frecuencias superiores a los 20 Khz ciclos por segundo.

Equipo utilizado para el ensayo de pulso ultrasónico.

El aparato de prueba, mostrado esquemáticamente en la Fig. 4.50, consiste de un generador de pulso, un par de transductores (transmisor y receptor), un amplificador, un circuito medidor de tiempo, una pantalla (display) de tiempo y cables conectores.

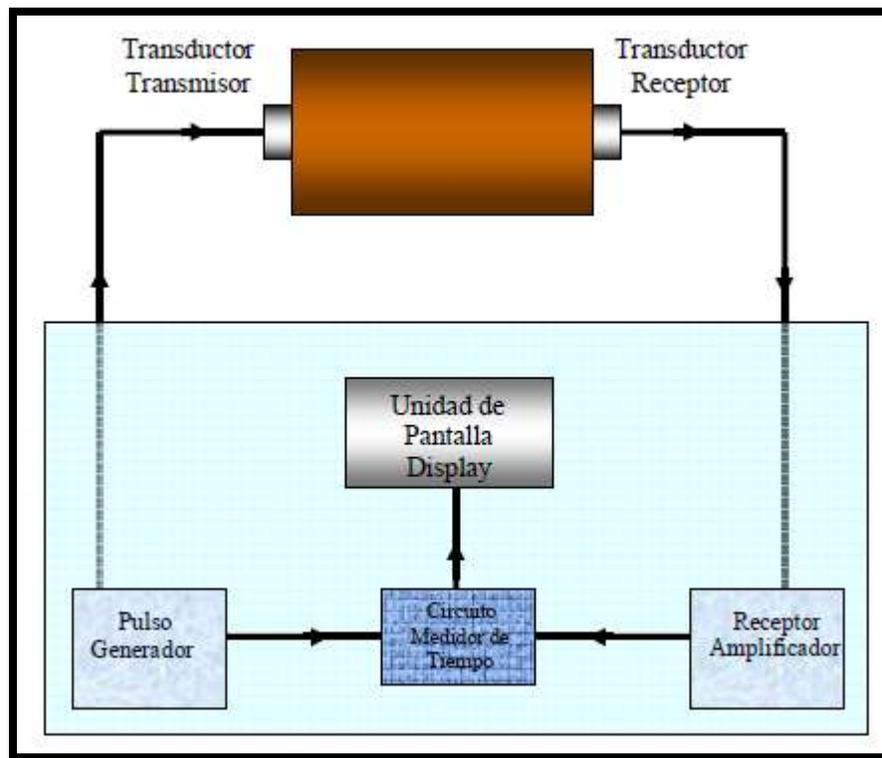


Figura 4.50 Esquema del Equipo de pulso ultrasónico

Generador de Pulso y Transductor Transmisor: El generador de pulso consiste en circuitos para generar pulsos de voltaje. El transductor para transformar esos pulsos electrónicos en ondas explosivas de energía mecánica tendrá una frecuencia de 54 kHz. El generador de pulso deberá producir pulsos repetitivos a una razón no menor de 3 pulsos por segundo. Un pulso de encendido será producido para iniciar el circuito de medición de tiempo.

Transductor Receptor y Amplificador: El transductor receptor será similar al transductor transmisor. El voltaje generado por este será amplificado tanto como sea necesario para producir pulsos disparados al circuito medidor de tiempo.

Circuito Medidor de Tiempo: La medición del tiempo será iniciado por un voltaje disparado desde el generador de pulso y el circuito medidor de tiempo será operado en la frecuencia de repetición del generador de pulso. El circuito medidor de tiempo proporcionará una señal de salida cuando el pulso receptor es detectado y esta señal de

salida deberá ser usada para determinar el tiempo de tránsito reflejado en la unidad de pantalla (display).

Unidad de Pantalla (Display): Dos tipos de unidades de pantalla son utilizados. Las unidades modernas usan un contador de tiempo a intervalos y una pantalla digital de lectura directa del tiempo de tránsito. Las unidades viejas usan un tubo de rayos catódicos (CRT) en el cual los pulsos transmitidos y recibidos son exhibidos como deflexiones de la traza con relación a un tiempo de escala establecido.

El equipo que se utilizó para el ensayo de pulso ultrasónico es el que se muestra en la fotografía siguiente fig. 4.51.



Figura 4.51 Equipo utilizado en el ensayo de pulso ultrasónico

- (1) Analizador de Pulso Ultrasónico
- (2) Coaxial. Cable con conectores BNC (2 piezas)
- (3) 50 KHz sondas, 2 (nominales) de las PC (25KHz y 150KHz sondas están disponibles como accesorios opcionales).

- (4) Agente de acoplamiento (pasta de contacto: glicerina 76%, alcohol etílico 22%, excipientes 2%).
- (5) Barra de calibración Tiempo de tránsito
- (6) Martillo para ensayos de hormigón digital.

4.4.1. Calibración del Equipo Ultrasonido

Se debe Verificar que el equipo está operando adecuadamente y efectuar un ajuste de tiempo cero. Dependiendo del equipo que se utilice se puede hacer de dos formas siguientes:

Se debe aplicar un agente de acoplamiento a los extremos de la barra de referencia, y presionar los transductores firmemente contra los extremos de la barra hasta que un tiempo de tránsito estable aparece en la pantalla. Ajustar la referencia cero hasta que el tiempo de tránsito coincide con el valor marcado en la barra, ver fig. 4.52. Para algunos instrumentos, el ajuste a cero es hecho mediante la aplicación del agente de acoplamiento y presionando las caras de los transductores juntos.



Figura 4.52 Calibración de Equipo de Pulsos Ultrasonicos

4.4.2. Realización del ensayo de pulsos ultrasónicos

Este ensayo está basado en la Norma ASTM D597-02 (Método de ensayo estándar para velocidad de pulso a través del concreto).

Luego de haber curado las probetas y cumplida la fecha de ensayo estas son transportadas al laboratorio, donde se les practico el ensayo de pulso ultrasónico y el ensayo de resistencia a compresión.

Previamente antes de realizar el ensayo de pulsos ultrasónicos, se tiene que registrar el peso y las dimensiones de cada probeta (ver fig. 4.53), esto para posteriormente determinar el peso volumétrico de las mismas. Ya que este parámetro es fundamental a la hora de realizar el cálculo del Módulo de Elasticidad Dinámico porque es directamente proporcional al mismo como se observó anteriormente en la ecuación que se utiliza para calcularla.

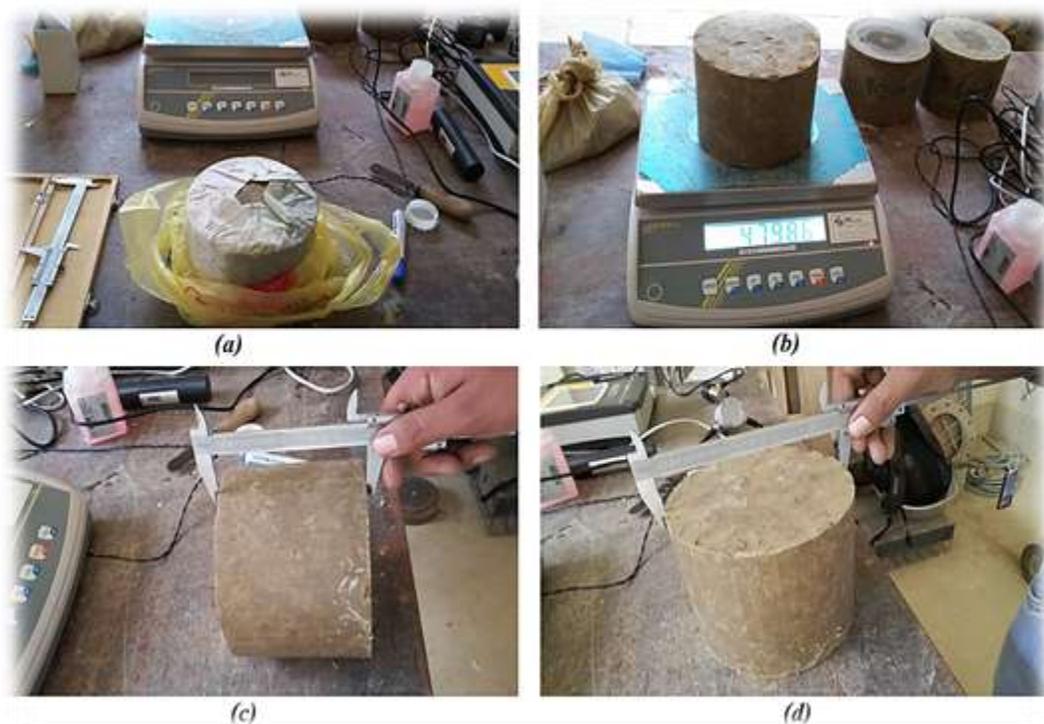


Figura 4.53 (a) Desconfinamiento de las Probetas de Suelo Cemento. (b) Medida del Peso de las Probetas de Suelo Cemento. (c) y (d) Medidas de las dimensiones de las Probetas de Suelo Cemento

Se debe asegurar que los transductores tengan un buen acoplamiento sobre la superficie de la probeta, un material viscoso (tal como aceite, vaselina, gelatina soluble en agua, hule moldeable o grasa) puede asegurar eficiente transferencia de energía entre el espécimen y los transductores. La función del agente de acoplamiento es eliminar aire entre las superficies de contacto de los transductores y espécimen.

Para el caso de la investigación el agente de acoplamiento utilizado fue el que vino especialmente con el equipo de pulso ultrasónico figura 4.54.



Figura 4.54 Engrasado de superficies laterales de las Probetas

Engrasado los transductores y la probeta se procede a juntarlo con las caras de las probetas procurando mantener una alineación adecuada con los transductores hasta que la lectura sea definida, Se deberá procurar no moverlos, los transductores y el espécimen, ya que se puede generar ruido y consecuentemente lecturas erróneas, ver fig. 4.55.

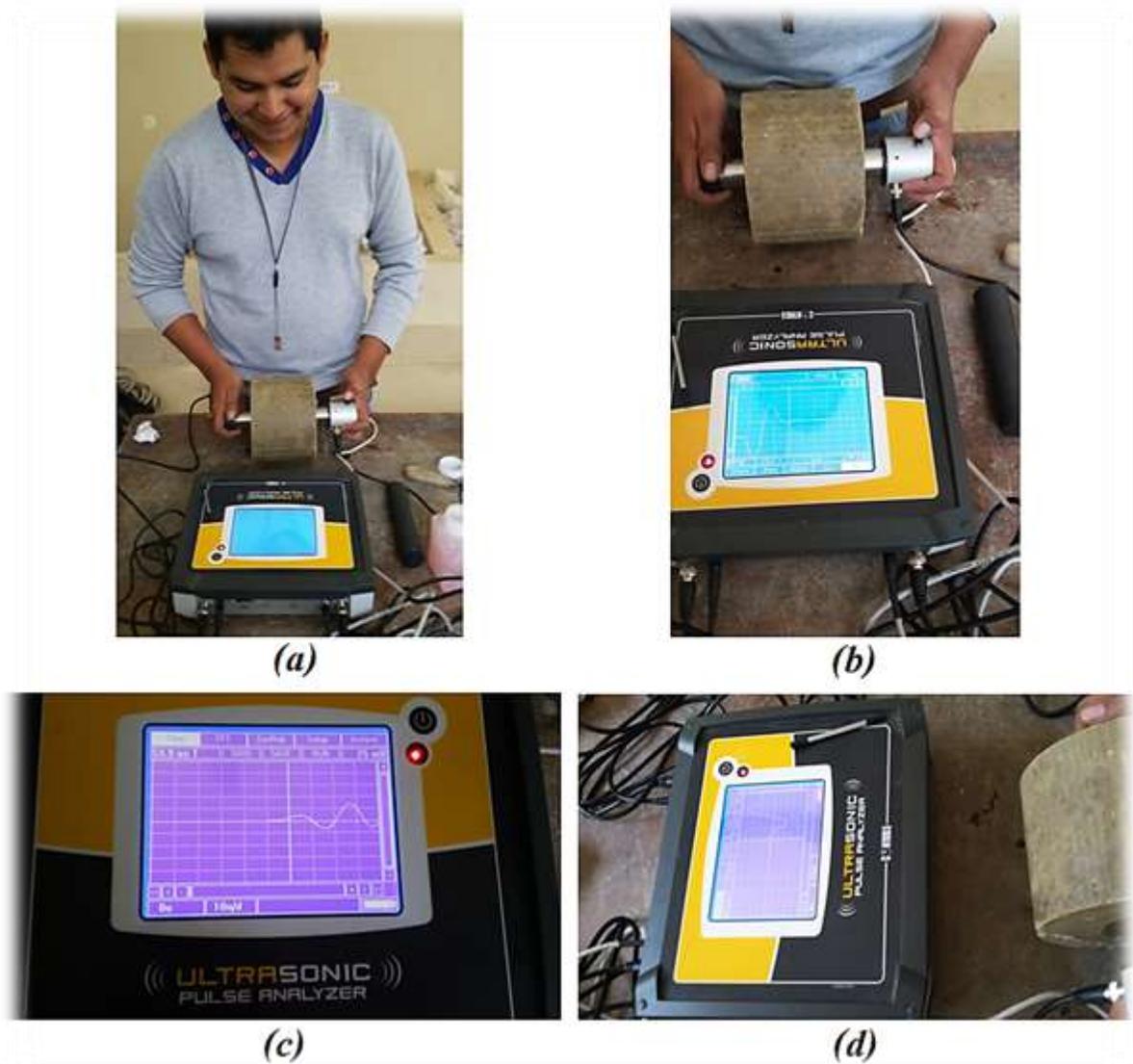


Figura 4.55 (a) (b) (c) y (d) Ensayo de pulso ultrasónico para las Probetas de Suelo Cemento

En el ensayo la onda se transmite a través de la muestra, y es captada por el transductor receptor, el cual convierte la energía mecánica de la onda en pulso electrónico. Después de recibido, se obtendrá el tiempo de propagación de la onda a través del material que, junto con la distancia entre transductores, nos ayuda a saber la velocidad de pulso.

4.4.3. Resultados Obtenidos Módulos de Elasticidad

Las probetas poseen 14.95 cm. en diámetro y 11.4 cm. en altura estas dimensiones son constantes en todas las probetas de suelo cemento a ser ensayados, en cuanto a su peso se obtuvieron resultados variables esto debido a la proporción de cemento en las muestras, contenido de humedad, etc.

Cálculo de área, volumen y peso volumétrico de las muestras.

Dimensiones:

d = diámetro = 14.95 cm.

h = altura de la probeta = 11.4 cm.

A= área transversal:

$$A = \frac{\pi}{4} * d^2$$

$$A = \frac{\pi}{4} * (14.95)^2 = 175.54 \text{ cm}^2$$

V= volumen del espécimen:

$$V = \frac{\pi}{4} * d^2 * (h)$$

$$V = \frac{\pi}{4} * (14.95)^2 * (11.4) = 2001.14 \text{ cm}^3$$

Q = Peso Volumétrico:

$$Q = \frac{\text{Peso de la Probeta de Suelo Cemento}}{\text{Volumen de la Probeta de Suelo Cemento}} = \frac{W(Kg)}{V(m^3)}$$

Una vez obtenido el Peso Volumétrico y la Velocidad de pulso para cada probeta de Suelo Cemento, procedemos a calcular el Modulo de Elasticidad Dinámico con la Siguiete Ecuación:

$$E_D = \frac{V^2 * Q * (1 + \nu) * (1 - 2 * \nu)}{1 - \nu}$$

Dónde:

E = Módulo de elasticidad dinámico (MN/m²)

V = Velocidad (km/s)

Q = Densidad del Suelo Cemento (Kg/m³)

ν = Coeficiente de Poisson.

El coeficiente de Poisson lo obtenemos de la tabla 4.33 de la IMCYC (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto), que para nuestro tipo de suelo Arena Arcillosa vendría a ser $\nu = 0.41$, este valor de coeficiente es el más se acomoda a nuestro suelo ya que en la teoría nos indica dos valores del coeficiente de Poisson que son: $\nu = 0.15$ para hormigones de Alta Resistencia, y $\nu = 0.30$ para hormigones de baja resistencia. Por esto decimos que para nuestro Suelo – Cemento el valor del coeficiente de Poisson es $\nu = 0.41$ ya que en teoría el suelo cemento alcanza una resistencia a compresión máxima de 105 kg/cm², que vendría a ser un valor de resistencia por debajo que un hormigo de baja resistencia.

Tabla 4.33 Valores del Coeficiente de Poisson

| INVESTIGADORES | ESTÁTICO | DINÁMICO | TIPO DE SUELO |
|------------------------------------|-------------|-------------|-----------------|
| Felt y Abrams | | 0.22 - 0.27 | Arenoso |
| | | 0.41 - 0.42 | Areno-arcilloso |
| Reinhold | 0.095-0.125 | | Areno-arcilloso |
| Portland Cement Association E.U.A. | 0.120-0.142 | | Arenoso |

IMCYC, Suelo Cemento Usos y Propiedades.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del ensayo de Pulsos Ultrasónicos para el Suelo – Cemento a diferentes Dosificaciones, (Cálculos completos ver Anexo 7 planilla de Cálculos del Ensayo de Ultrasonido para la Determinación del Módulo de Elasticidad Dinámico para el Suelo Cemento).

Tabla 4.34 Resultados de Ensayos de Ultrasonido para la Determinación del Módulo de Elasticidad Edad de Prueba 3 días

| ESPECÍMEN N° | | DOSIFICACION (% cemento) | MASA (gr.) | VOLUMEN (cm ³) | PESO VOLUMÉTRICO (kg/m ³) | DISTANCIA ENTRE TRANSDUCTORES (mm) | TIEMPO (μ seg.) | VELOCIDAD (km/s) | MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO | | |
|--------------|-----|--------------------------|------------|----------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-----------------|------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| | | | | | | | | | (MN/m ²) | (Kg/cm ²) | (E x 10 ⁵) Psi |
| 3-1-A | 3% | 4834,6 | 2001,14 | 2415,92 | 114 | 85,07 | 1,340 | 1866,44 | 19045,30 | 270,89 | |
| 3-2-A | 3% | 4772,6 | 2001,14 | 2384,94 | 114 | 97,40 | 1,170 | 1405,43 | 14341,13 | 203,98 | |
| 3-3-A | 3% | 4804,7 | 2001,14 | 2400,98 | 114 | 87,77 | 1,299 | 1742,53 | 17780,88 | 252,91 | |
| 3-4-A | 3% | 4799,7 | 2001,14 | 2398,48 | 114 | 88,07 | 1,294 | 1728,87 | 17641,56 | 250,93 | |
| 6-1-A | 6% | 4759,1 | 2001,14 | 2378,20 | 114 | 74,17 | 1,537 | 2417,02 | 24663,43 | 350,80 | |
| 6-2-A | 6% | 4722,2 | 2001,14 | 2359,76 | 114 | 80,80 | 1,411 | 2020,66 | 20619,01 | 293,28 | |
| 6-3-A | 6% | 4725,3 | 2001,14 | 2361,31 | 114 | 75,53 | 1,509 | 2313,79 | 23610,12 | 335,82 | |
| 6-4-A | 6% | 4743,1 | 2001,14 | 2370,20 | 114 | 67,00 | 1,701 | 2951,79 | 30120,27 | 428,42 | |
| 9-1-A | 9% | 4729,3 | 2001,14 | 2363,30 | 114 | 65,83 | 1,732 | 3048,44 | 31106,51 | 442,45 | |
| 9-2-A | 9% | 4746,2 | 2001,14 | 2371,75 | 114 | 66,73 | 1,708 | 2977,37 | 30381,31 | 432,13 | |
| 9-3-A | 9% | 4753,9 | 2001,14 | 2375,60 | 114 | 65,93 | 1,729 | 3055,01 | 31173,54 | 443,40 | |
| 9-4-A | 9% | 4719,1 | 2001,14 | 2358,21 | 114 | 65,93 | 1,729 | 3032,64 | 30945,34 | 440,15 | |
| 12-1-A | 12% | 4780,6 | 2001,14 | 2388,94 | 114 | 61,87 | 1,843 | 3489,32 | 35605,34 | 506,43 | |
| 12-2-A | 12% | 4758,1 | 2001,14 | 2377,70 | 114 | 50,70 | 2,249 | 5171,18 | 52767,17 | 750,54 | |
| 12-3-A | 12% | 4794,1 | 2001,14 | 2395,69 | 114 | 62,67 | 1,819 | 3410,41 | 34800,06 | 494,98 | |
| 12-4-A | 12% | 4778,6 | 2001,14 | 2387,94 | 114 | 59,37 | 1,920 | 3787,80 | 38651,06 | 549,76 | |



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGON

ENSAYO DE ULTRASONIDO PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO

Proyecto: Correlación del Módulo de Elasticidad, Resistencia a Compresión y CBR (Valor Soporte California), para un mejoramiento Suelo Cemento de una Arena - Arcillosa

Universitario: Leonard Horacio Rivero Rocha

Edad de Prueba: 3 Días

Tipo de Suelo: Arena Arcillosa A-4 ; SC

Tipo de Cemento: Portland ASTM C-150 "EL PUENTE" SOBOCE

Fecha: Abril de 2015

REFERENCIA ASTM D597-02 (Método de ensayo estándar para velocidad de pulso a través del concreto).

Tabla 4.35 Resultados de Ensayos de Ultrasonido para la Determinación del Módulo de Elasticidad Edad de Prueba 7 días

|  UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MIS AEL SARACHO" FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGON | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------------|---------------|-------------------------------|---|--|-----------------|----|---------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| ENSAYO DE ULTRASONIDO PARA DETERMINAR EL MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO | | | | | | | | | | | |
| Proyecto: Correlación del Modulo de Elasticidad, Resistencia a Compresión y CBR (Valor Soporte California), para un mejoramiento Suelo Cemento de una Arena - Arcillosa Universitario: Leonard Horacio Rivero Rocha Edad de Prueba: 7 Dias Tipo de Suelo: Arena Arcillosa A-4 ; SC Tipo de Cemento: Portland ASTM C-150 "EL PUENTE" SOBOCE Fecha: Abril de 2015 | | | | | | | | | | | |
| REFERENCIA ASTM D597-02 (Método de ensayo estándar para velocidad de pulso a través del concreto). | | | | | | | | | | | |
| ESPECÍMEN N° | DOSIFICACION (% cemento) | MASA (gr.) | VOLUMEN (cm ³) | PESO VOLUMETRICO (kg/m ³) | DISTANCIA ENTRE TRANSDUCTORES (mm) | TIEMPO seg.) | (μ | VELOCIDAD (km/s) | MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO | | |
| | | | | | | | | | (MN/m ²) | (Kg/cm ²) | (Ex 10 ³) Psi |
| 3-1-B | 3% | 4800,6 | 2001,14 | 2398,93 | 114 | 79,37 | | 1,436 | 2129,08 | 21725,28 | 309,01 |
| 3-2-B | 3% | 4824 | 2001,14 | 2410,63 | 114 | 78,43 | | 1,453 | 2190,68 | 22353,84 | 317,95 |
| 3-3-B | 3% | 4667,8 | 2001,14 | 2332,57 | 114 | 74,60 | | 1,528 | 2343,19 | 23910,06 | 340,09 |
| 3-4-B | 3% | 4699,3 | 2001,14 | 2348,31 | 114 | 81,87 | | 1,393 | 1958,80 | 19987,80 | 284,30 |
| 6-1-B | 6% | 4675,1 | 2001,14 | 2336,22 | 114 | 71,80 | | 1,588 | 2533,46 | 25851,64 | 367,70 |
| 6-2-B | 6% | 4811,2 | 2001,14 | 2404,23 | 114 | 73,80 | | 1,545 | 2467,82 | 25181,80 | 358,17 |
| 6-3-B | 6% | 4688,5 | 2001,14 | 2342,92 | 114 | 73,77 | | 1,545 | 2407,05 | 24561,77 | 349,36 |
| 6-4-B | 6% | 4686,1 | 2001,14 | 2341,72 | 114 | 68,27 | | 1,670 | 2809,09 | 28664,23 | 407,71 |
| 9-1-B | 9% | 4844 | 2001,14 | 2420,62 | 114 | 67,87 | | 1,680 | 2938,08 | 29980,39 | 426,43 |
| 9-2-B | 9% | 4664,1 | 2001,14 | 2330,72 | 114 | 63,10 | | 1,807 | 3272,51 | 33392,99 | 474,97 |
| 9-3-B | 9% | 4665,9 | 2001,14 | 2331,62 | 114 | 65,00 | | 1,754 | 3085,18 | 31481,46 | 447,78 |
| 9-4-B | 9% | 4715,8 | 2001,14 | 2356,56 | 114 | 61,10 | | 1,866 | 3528,95 | 36009,66 | 512,19 |
| 12-1-B | 12% | 4898,1 | 2001,14 | 2447,66 | 114 | 56,73 | | 2,009 | 4251,31 | 43380,76 | 617,03 |
| 12-2-B | 12% | 4849,7 | 2001,14 | 2423,47 | 114 | 55,80 | | 2,043 | 4351,30 | 44400,98 | 631,54 |
| 12-3-B | 12% | 4866,3 | 2001,14 | 2431,77 | 114 | 52,15 | | 2,186 | 4998,76 | 51007,77 | 725,51 |
| 12-4-B | 12% | 4835,2 | 2001,14 | 2416,22 | 114 | 54,87 | | 2,078 | 4487,14 | 45787,13 | 651,26 |

Tabla 4.36 Resultados de Ensayos de Ultrasonido para la Determinación del Módulo de Elasticidad Edad de Prueba 28días

|  UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO" FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGON | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------|------------|---------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------|------------------|--------------------------------|----------|--------------|
| ENSAYO DE ULTRASONIDO PARA DETERMINAR EL MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO | | | | | | | | | | |
| Proyecto: Correlación del Modulo de Elasticidad, Resistencia a Compresión y CBR (Valor Soporte California), para un mejoramiento Suelo Cemento de una Arena - Arcillosa Universitario: Leonard Horacio Rivero Rocha Edad de Prueba: 28 Dias Tipo de Suelo: Arena Arcillosa A-4 ; SC Tipo de Cemento: Portland ASTM C-150 "EL PUENTE" SOBOCE Fecha: Mayo de 2015 | | | | | | | | | | |
| REFERENCIA ASTM D597-02 (Método de ensayo estándar para velocidad de pulso a través del concreto). | | | | | | | | | | |
| ESPECÍMEN N° | DOSIFICACION (% cemento) | MASA (gr.) | VOLUMEN (cm³) | PESO VOLUMETRICO (kg/m³) | DISTANCIA ENTRE TRANSDUCTORES (mm) | TIEMPO (μ seg.) | VELOCIDAD (km/s) | MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO | | |
| | | | | | | | | (MN/m²) | (Kg/cm²) | (Ex 10³) Psi |
| 3-1-C | 3% | 4740,2 | 2001,14 | 2368,75 | 114 | 68,17 | 1,672 | 2849,87 | 29080,29 | 413,63 |
| 3-2-C | 3% | 4741,7 | 2001,14 | 2369,50 | 114 | 74,43 | 1,532 | 2390,95 | 24397,50 | 347,02 |
| 3-3-C | 3% | 4778,7 | 2001,14 | 2387,99 | 114 | 72,47 | 1,573 | 2542,17 | 25940,56 | 368,97 |
| 3-4-C | 3% | 4743,9 | 2001,14 | 2370,60 | 114 | 70,50 | 1,617 | 2666,43 | 27208,43 | 387,00 |
| 6-1-C | 6% | 4733,8 | 2001,14 | 2365,55 | 114 | 66,50 | 1,714 | 2990,47 | 30514,95 | 434,03 |
| 6-2-C | 6% | 4739,6 | 2001,14 | 2368,45 | 114 | 64,63 | 1,764 | 3169,57 | 32342,58 | 460,03 |
| 6-3-C | 6% | 4707,6 | 2001,14 | 2352,46 | 114 | 67,30 | 1,694 | 2903,63 | 29628,90 | 421,43 |
| 6-4-C | 6% | 4712,4 | 2001,14 | 2354,86 | 114 | 63,77 | 1,788 | 3237,63 | 33037,02 | 469,90 |
| 9-1-C | 9% | 4749 | 2001,14 | 2373,15 | 114 | 57,07 | 1,998 | 4073,89 | 41570,31 | 591,28 |
| 9-2-C | 9% | 4747,1 | 2001,14 | 2372,20 | 114 | 63,37 | 1,799 | 3302,77 | 33701,77 | 479,36 |
| 9-3-C | 9% | 4806,2 | 2001,14 | 2401,73 | 114 | 59,33 | 1,921 | 3813,96 | 38918,00 | 553,55 |
| 9-4-C | 9% | 4835,7 | 2001,14 | 2416,47 | 114 | 60,43 | 1,886 | 3698,95 | 37744,39 | 536,86 |
| 12-1-C | 12% | 4801,7 | 2001,14 | 2399,48 | 114 | 57,97 | 1,967 | 3992,18 | 40736,57 | 579,42 |
| 12-2-C | 12% | 4789,2 | 2001,14 | 2393,24 | 114 | 48,50 | 2,351 | 5687,90 | 58039,76 | 825,53 |
| 12-3-C | 12% | 4720,2 | 2001,14 | 2358,76 | 114 | 55,93 | 2,038 | 4214,94 | 43009,57 | 611,75 |
| 12-4-C | 12% | 4905,8 | 2001,14 | 2451,50 | 114 | 53,43 | 2,133 | 4800,18 | 48981,43 | 696,69 |

Tabla 4.37 Resultados de Ensayos de Ultrasonido para la Determinación del Módulo de Elasticidad Edad de Prueba 60días

| UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO" | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------------|---------------|-------------------------------|---|--|--------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA | | | | | | | | | | |
| PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL | | | | | | | | | | |
| LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGON | | | | | | | | | | |
| ENSAYO DE ULTRASONIDO PARA DETERMINAR EL MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO | | | | | | | | | | |
| Proyecto: Correlación del Modulo de Elasticidad, Resistencia a Compresión y CBR (Valor Soporte California), para un mejoramiento Suelo Cemento de una Arena - Arcillosa Universitario: Leonard Horacio Rivero Rocha Tipo de Suelo: Arena Arcillosa A-4 ; SC Tipo de Cemento: Portland ASTM C-150 "EL PUENTE" SOBOCE | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | Edad de Prueba: 60 Días | | |
| | | | | | | | | Fecha: Mayo de 2015 | | |
| REFERENCIA ASTM D597-02 (Método de ensayo estándar para velocidad de pulso a través del concreto). | | | | | | | | | | |
| ESPECÍMEN N° | DOSIFICACION (% cemento) | MASA (gr.) | VOLUMEN (cm ³) | PESO VOLUMETRICO (kg/m ³) | DISTANCIA ENTRE TRANSDUCTORES (mm) | TIEMPO (μ seg.) | VELOCIDAD (km/s) | MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO | | |
| | | | | | | | | (MN/m ²) | (Kg/cm ²) | (Ex 10 ³) Psi |
| 3-1-D | 3% | 4726 | 2001,14 | 2361,66 | 114 | 70,47 | 1,618 | 2658,88 | 27131,41 | 385,91 |
| 3-2-D | 3% | 4710,6 | 2001,14 | 2353,96 | 114 | 72,50 | 1,572 | 2503,64 | 25547,38 | 363,37 |
| 3-3-D | 3% | 4718,2 | 2001,14 | 2357,76 | 114 | 64,63 | 1,764 | 3155,26 | 32196,55 | 457,95 |
| 3-4-D | 3% | 4814,3 | 2001,14 | 2405,78 | 114 | 64,50 | 1,767 | 3232,85 | 32988,29 | 469,21 |
| 6-1-D | 6% | 4813,5 | 2001,14 | 2405,38 | 114 | 62,37 | 1,828 | 3457,23 | 35277,84 | 501,78 |
| 6-2-D | 6% | 4703,9 | 2001,14 | 2350,61 | 114 | 59,60 | 1,913 | 3699,46 | 37749,54 | 536,93 |
| 6-3-D | 6% | 4798,6 | 2001,14 | 2397,94 | 114 | 62,57 | 1,822 | 3424,53 | 34944,16 | 497,03 |
| 6-4-D | 6% | 4809,4 | 2001,14 | 2403,33 | 114 | 62,20 | 1,833 | 3472,82 | 35436,94 | 504,04 |
| 9-1-D | 9% | 4753,9 | 2001,14 | 2375,60 | 114 | 58,43 | 1,951 | 3889,56 | 39689,43 | 564,52 |
| 9-2-D | 9% | 4763,8 | 2001,14 | 2380,55 | 114 | 59,13 | 1,928 | 3805,93 | 38836,04 | 552,39 |
| 9-3-D | 9% | 4782,7 | 2001,14 | 2389,99 | 114 | 58,17 | 1,960 | 3949,09 | 40296,83 | 573,16 |
| 9-4-D | 9% | 4827,1 | 2001,14 | 2412,18 | 114 | 58,30 | 1,955 | 3967,54 | 40485,11 | 575,84 |
| 12-1-D | 12% | 4818,4 | 2001,14 | 2407,83 | 114 | 52,47 | 2,173 | 4889,99 | 49897,87 | 709,73 |
| 12-2-D | 12% | 4818,1 | 2001,14 | 2407,68 | 114 | 54,73 | 2,083 | 4493,08 | 45847,76 | 652,12 |
| 12-3-D | 12% | 4800,6 | 2001,14 | 2398,93 | 114 | 50,47 | 2,259 | 5265,73 | 53731,92 | 764,26 |
| 12-4-D | 12% | 4775,7 | 2001,14 | 2386,49 | 114 | 55,23 | 2,064 | 4373,27 | 44625,25 | 634,73 |

Tabla 4.38 Resumen Final de Resultados Ensayo Determinación del Módulo de Elasticidad Dinámico

| | |  UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO" FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGON | | | | | | | |
|--|--------------------------|---|---|---------------------------------------|---|---------------------------------------|---|--|---|
| RESUMEN FINAL DE RESULTADOS ENSAYO DETERMINACION DEL MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO | | | | | | | | | |
| Proyecto: | | Correlación del Modulo de Elasticidad, Resistencia a Compresión y CBR (Valor Soporte California), para un mejoramiento Suelo Cemento de una Arena - Arcillosa | | | | | | | |
| Universitario: Leonard Horacio Rivero Rocha | | | | | | | | Tipo de Suelo: Arena Arcillosa A-4 ; SC | |
| Tipo de Cemento: Portland ASTM C-150 "EL PUENTE" SOBOCE | | Fecha: Mayo de 2015 | | | | | | | |
| REFERENCIA ASTM D597-02 (Método de ensayo estándar para velocidad de pulso a través del concreto). | | | | | | | | | |
| DENOMINACION | DOSIFICACION (% cemento) | EDAD DE PRUEBA: 3 DIAS | | EDAD DE PRUEBA: 7 DIAS | | EDAD DE PRUEBA: 28 DIAS | | EDAD DE PRUEBA: 60 DIAS | |
| | | PESO VOLUMETRICO (kg/m ³) | MODULO DE ELASTICIDAD (kg/cm ²) | PESO VOLUMETRICO (kg/m ³) | MODULO DE ELASTICIDAD (kg/cm ²) | PESO VOLUMETRICO (kg/m ³) | MODULO DE ELASTICIDAD (kg/cm ²) | PESO VOLUMETRICO (kg/m ³) | MODULO DE ELASTICIDAD (kg/cm ²) |
| 3-1 | 3% | 2415,92 | 19045,30 | 2398,93 | 21725,28 | 2368,75 | 29080,29 | 2361,66 | 27131,41 |
| 3-2 | 3% | 2384,94 | 14341,13 | 2410,63 | 22353,84 | 2369,50 | 24397,50 | 2353,96 | 25547,38 |
| 3-3 | 3% | 2400,98 | 17780,88 | 2332,57 | 23910,06 | 2387,99 | 25940,56 | 2357,76 | 32196,55 |
| 3-4 | 3% | 2398,48 | 17641,56 | 2348,31 | 19987,80 | 2370,60 | 27208,43 | 2405,78 | 32988,29 |
| 6-1 | 6% | 2378,20 | 24663,43 | 2336,22 | 25851,64 | 2365,55 | 30514,95 | 2405,38 | 35277,84 |
| 6-2 | 6% | 2359,76 | 20619,01 | 2404,23 | 25181,80 | 2368,45 | 32342,58 | 2350,61 | 37749,54 |
| 6-3 | 6% | 2361,31 | 23610,12 | 2342,92 | 24561,77 | 2352,46 | 29628,90 | 2397,94 | 34944,16 |
| 6-4 | 6% | 2370,20 | 30120,27 | 2341,72 | 28664,23 | 2354,86 | 33037,02 | 2403,33 | 35436,94 |
| 9-1 | 9% | 2363,30 | 31106,51 | 2420,62 | 29980,39 | 2373,15 | 41570,31 | 2375,60 | 39689,43 |
| 9-2 | 9% | 2371,75 | 30381,31 | 2330,72 | 33392,99 | 2372,20 | 33701,77 | 2380,55 | 38836,04 |
| 9-3 | 9% | 2375,60 | 31173,54 | 2331,62 | 31481,46 | 2401,73 | 38918,00 | 2389,99 | 40296,83 |
| 9-4 | 9% | 2358,21 | 30945,34 | 2356,56 | 36009,66 | 2416,47 | 37744,39 | 2412,18 | 40485,11 |
| 12-1 | 12% | 2388,94 | 35605,34 | 2447,66 | 43380,76 | 2399,48 | 40736,57 | 2407,83 | 49897,87 |
| 12-2 | 12% | 2377,70 | 52767,17 | 2423,47 | 44400,98 | 2393,24 | 58039,76 | 2407,68 | 45847,76 |
| 12-3 | 12% | 2395,69 | 34800,06 | 2431,77 | 51007,77 | 2358,76 | 43009,57 | 2398,93 | 53731,92 |
| 12-4 | 12% | 2387,94 | 38651,06 | 2416,22 | 45787,13 | 2451,50 | 48981,43 | 2386,49 | 44625,25 |

4.5. ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

El ensayo de compresión estudia el comportamiento de un material sometido a un esfuerzo de compresión progresivamente creciente, ejercido por una máquina apropiada, hasta conseguir la falla del material. La resistencia a la compresión se mide ensayando probetas cilíndricas en una máquina de ensayos de compresión, la resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida entre el área de la sección que resiste la carga y se reporta en (Kg/cm² o psi).

Las pruebas de resistencia a la compresión se usan fundamentalmente para determinar que la mezcla de suelo cemento cumpla con los requerimientos de resistencia especificada, $f'c$.

El ensayo de compresión se realizara conforme a la Norma ASTM D 1633 (Métodos de ensayo Estándar para Esfuerzos de Compresión de Cilindros compactados de Suelo-cemento). La norma utiliza dos procedimientos para el ensayo de los cuales utilizaremos el método C que corresponde a el procedimiento que usa para el ensayo de probetas de 6.0 pulgadas. (149.5 mm) en diámetro y 4.5 pulgadas. (114 mm) en altura. La relación altura-diámetro es igual a 0.75.

4.5.1. Equipo de Ensayo para Compresión Simple

Esta máquina puede ser de cualquier tipo que tenga la capacidad suficiente y que se pueda controlar para proporcionar la razón de carga prescrita en la norma utilizada (ASTM D 1633), La razón de carga aplicada debe de oscilar entre el rango de 20 +/-10 psi (140 +/-70 kPa)/s ver fig. 4.56.

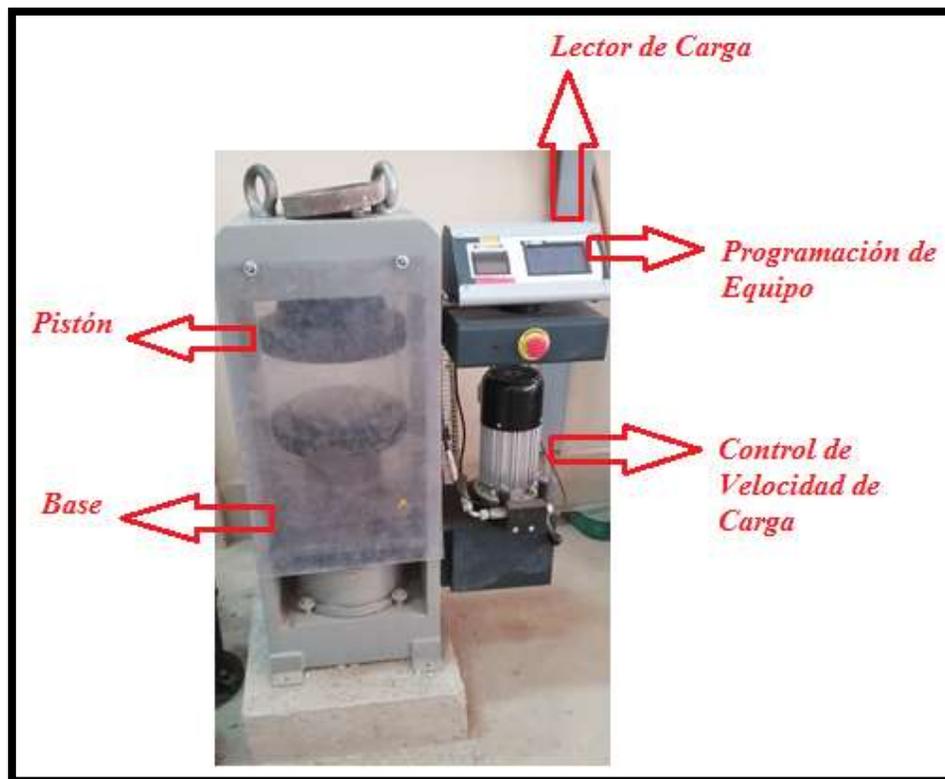


Figura 4.56 Equipo de Ensayo a Compresión

4.5.2. Realización del Ensayo a Compresión Simple

Luego de la realización del ensayo de pulso ultrasónico las probetas son colocadas a saturación por medio de inmersión en agua durante un periodo de cuatro horas (fig. 4.57) esto con el objeto de simular las condiciones más desfavorables a las que puede estar expuesto el material.



Figura 4.57 Saturación de las probetas previo al ensayo de Compresión

Cumplidas las cuatro horas las probetas son sacadas del agua e inmediatamente ensayados a compresión simple, ver fig. 4.58.



(a)

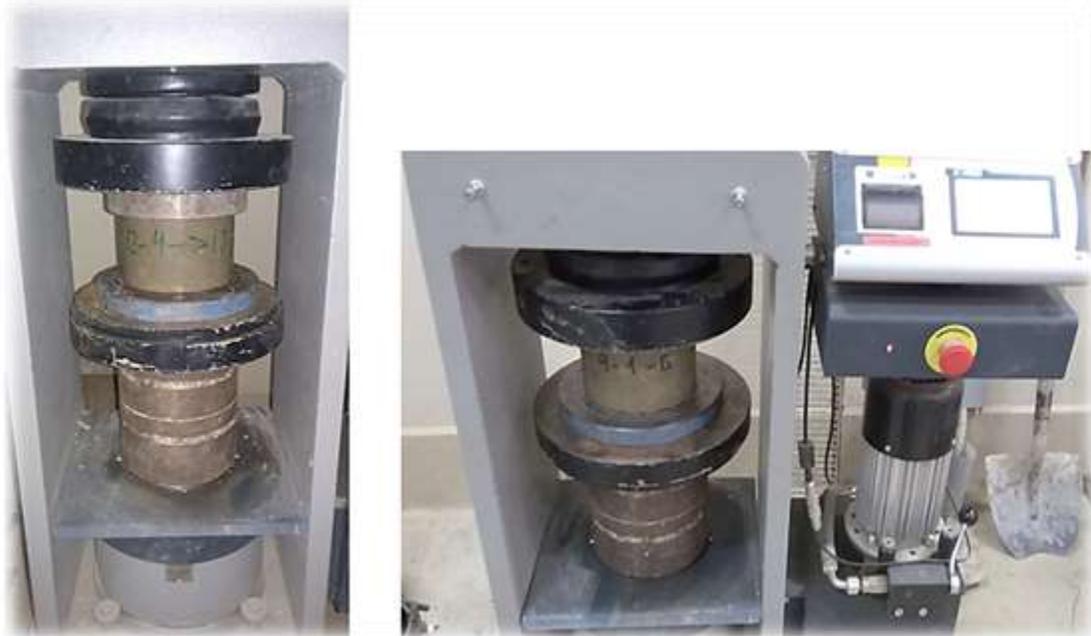


(b)

Figura 4.58 (a) y (b) Probetas Saturadas superficialmente secas

Las probetas fueron colocadas en la máquina de compresión y se obtuvo la carga de falla fig. 4.59 y fig. 4.60 esta carga al ser dividida por el área transversal proporciona

el esfuerzo de compresión que soporta dicho espécimen, este esfuerzo será corregido por un factor, debido a que las probetas no poseen una relación 2:1 como lo expuesto en Capítulo 2 (2.8 Diseño de mezclas de suelo cemento, tabla 2.20. Factores de corrección para relaciones h/D menores a 2.0), el factor de corrección utilizado fue de 0.70).



(a)



(b)

Figura 4.59 (a) y (b) Probetas antes del Ensayo a Compresión Simple



(a)



(b)

Figura 4.60 Probetas Después del Ensayo a Compresión Simple

Luego de la realización del ensayo de compresión se retiró las Probetas y se observó que el tipo de falla producido Fig. 4.61, para estos especímenes fue de tipo cónico que es una de las fallas que indica que los esfuerzos de compresión son distribuidos más adecuadamente.



(a)



(b)

Figura 4.61 *Falla cónica presentada en las probetas ensayadas*

4.5.3. Resultados Obtenidos Resistencia a Compresión Simple

A continuación se presentan los resultados obtenidos del ensayo de Resistencia a Compresión Simple para el Suelo – Cemento a diferentes Dosificaciones, (Cálculos completos ver Anexo 8 planilla de Cálculos del Ensayo de Resistencia a Compresión Simple para el Suelo Cemento).

Tabla 4.39 Resultados del Ensayo de Resistencia a Compresión Simple Edad de Prueba 3 días

| ESPECÍMEN N° | | DOSIFICACION (% cemento) | DIAMETRO DEL ESPECIMEN (cm) | AREA (cm ²) | CARGA DE COMPRESIÓN (KN) | ESFUERZO DE COMPRESIÓN (KN/cm ²) | ESFUERZO DE COMPRESIÓN X 0,70 FACTOR CORRECCIÓN RELACION (h/D) | | |
|--------------|--|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------------|--|---|-----------------------|--------|
| | | | | | | | (Mpa) | (Kg/cm ²) | (Psi) |
| 3-1-A | | 3% | 14,95 | 175,54 | 23,9 | 0,136 | 0,95 | 9,72 | 138,23 |
| 3-2-A | | 3% | 14,95 | 175,54 | 24,7 | 0,141 | 0,98 | 10,04 | 142,86 |
| 3-3-A | | 3% | 14,95 | 175,54 | 24,9 | 0,142 | 0,99 | 10,13 | 144,02 |
| 3-4-A | | 3% | 14,95 | 175,54 | 25 | 0,142 | 1,00 | 10,17 | 144,60 |
| 6-1-A | | 6% | 14,95 | 175,54 | 37,5 | 0,214 | 1,50 | 15,25 | 216,89 |
| 6-2-A | | 6% | 14,95 | 175,54 | 37,4 | 0,213 | 1,49 | 15,21 | 216,31 |
| 6-3-A | | 6% | 14,95 | 175,54 | 37,3 | 0,212 | 1,49 | 15,17 | 215,74 |
| 6-4-A | | 6% | 14,95 | 175,54 | 41,3 | 0,235 | 1,65 | 16,79 | 238,87 |
| 9-1-A | | 9% | 14,95 | 175,54 | 53,8 | 0,306 | 2,15 | 21,88 | 311,17 |
| 9-2-A | | 9% | 14,95 | 175,54 | 55,8 | 0,318 | 2,23 | 22,69 | 322,74 |
| 9-3-A | | 9% | 14,95 | 175,54 | 51,1 | 0,291 | 2,04 | 20,78 | 295,55 |
| 9-4-A | | 9% | 14,95 | 175,54 | 60,6 | 0,345 | 2,42 | 24,64 | 350,50 |
| 12-1-A | | 12% | 14,95 | 175,54 | 72,9 | 0,415 | 2,91 | 29,64 | 421,64 |
| 12-2-A | | 12% | 14,95 | 175,54 | 72,4 | 0,412 | 2,89 | 29,44 | 418,75 |
| 12-3-A | | 12% | 14,95 | 175,54 | 70,3 | 0,400 | 2,80 | 28,59 | 406,60 |
| 12-4-A | | 12% | 14,95 | 175,54 | 57,5 | 0,328 | 2,29 | 23,38 | 332,57 |



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGON

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

Proyecto: Correlación del Modulo de Elasticidad, Resistencia a Compresión y CBR (Valor Soporte California), para un mejoramiento Suelo Cemento de una Arena - Arcillosa

Universitario: Leonard Horacio Rivero Rocha

Edad de Prueba: 3 Dias

Tipo de Suelo: Arena Arcillosa A-4 ; SC

Tipo de Cemento: Portland ASTM C-150 "EL PUENTE" SOBOCE

Fecha: Abril de 2015

REFERENCIA ASTM D 1633-96

Tabla 4.40 Resultados del Ensayo de Resistencia a Compresión Simple Edad de Prueba 7 días

| ESPECÍMEN N° | | DOSIFICACION (% cemento) | DIAMEIRO DEL ESPECIMEN (cm) | AREA (cm ²) | CARGA DE COMPRESIÓN (KN) | ESFUERZO DE COMPRESIÓN (KN/cm ²) | ESFUERZO DE COMPRESIÓN X 0,70 FACTOR CORRECCIÓN RELACION (h/D) | | |
|-----------------|--|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|--|---|-----------------------|--------|
| | | | | | | | (Mpa) | (Kg/cm ²) | (Psi) |
| 3-1-B | | 3% | 14,95 | 175,54 | 28,3 | 0,161 | 1,13 | 11,51 | 163,68 |
| 3-2-B | | 3% | 14,95 | 175,54 | 33,9 | 0,193 | 1,35 | 13,78 | 196,07 |
| 3-3-B | | 3% | 14,95 | 175,54 | 31,5 | 0,179 | 1,26 | 12,81 | 182,19 |
| 3-4-B | | 3% | 14,95 | 175,54 | 29,2 | 0,166 | 1,16 | 11,87 | 168,89 |
| 6-1-B | | 6% | 14,95 | 175,54 | 44,4 | 0,253 | 1,77 | 18,05 | 256,80 |
| 6-2-B | | 6% | 14,95 | 175,54 | 46,7 | 0,266 | 1,86 | 18,99 | 270,10 |
| 6-3-B | | 6% | 14,95 | 175,54 | 49,9 | 0,284 | 1,99 | 20,29 | 288,61 |
| 6-4-B | | 6% | 14,95 | 175,54 | 36,8 | 0,210 | 1,47 | 14,96 | 212,84 |
| 9-1-B | | 9% | 14,95 | 175,54 | 59,6 | 0,340 | 2,38 | 24,24 | 344,71 |
| 9-2-B | | 9% | 14,95 | 175,54 | 56,5 | 0,322 | 2,25 | 22,97 | 326,78 |
| 9-3-B | | 9% | 14,95 | 175,54 | 56,9 | 0,324 | 2,27 | 23,14 | 329,10 |
| 9-4-B | | 9% | 14,95 | 175,54 | 61,8 | 0,352 | 2,46 | 25,13 | 357,44 |
| 12-1-B | | 12% | 14,95 | 175,54 | 81,1 | 0,462 | 3,23 | 32,98 | 469,07 |
| 12-2-B | | 12% | 14,95 | 175,54 | 81,3 | 0,463 | 3,24 | 33,06 | 470,22 |
| 12-3-B | | 12% | 14,95 | 175,54 | 78,7 | 0,448 | 3,14 | 32,00 | 455,19 |
| 12-4-B | | 12% | 14,95 | 175,54 | 75,8 | 0,432 | 3,02 | 30,82 | 438,41 |



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGON

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

Proyecto: Correlación del Modulo de Elasticidad, Resistencia a Compresión y CBR (Valor Soporte California), para un mejoramiento Suelo Cemento de una Arena - Arcillosa

Universitario: Leonard Horacio Rivero Rocha

Edad de Prueba: 7 Dias

Tipo de Suelo: Arena Arcillosa A-4 ; SC

Tipo de Cemento: Portland ASTM C-150 "EL PUENTE" SOBOCE

Fecha: Abril de 2015

REFERENCIA ASTM D 1633-96

Tabla 4.41 Resultados del Ensayo de Resistencia a Compresión Simple Edad de Prueba 28 días

|  UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO" FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGON | | | | | | | | |
|---|-----------------------------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|--|---|-----------------------|--------|
| ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE | | | | | | | | |
| Proyecto: Correlación del Modulo de Elasticidad, Resistencia a Compresión y CBR (Valor Soporte California), para un mejoramiento Suelo Cemento de una Arena - Arcillosa | | | | | | | | |
| Universitario: Leonard Horacio Rivero Rocha | | | | | | Edad de Prueba: 28 Días | | |
| Tipo de Suelo: Arena Arcillosa A-4 ; SC | | | | | | | | |
| Tipo de Cemento: Portland ASTM C-150 "EL PUENTE" SOBOCE | | | | | | Fecha: Mayo de 2015 | | |
| REFERENCIA ASTM D 1633-96 | | | | | | | | |
| ESPECÍMEN N° | DOSIFICACION (% cemento) | DIAMETRO DEL ESPECIMEN (cm) | AREA (cm ²) | CARGA DE COMPRESIÓN (KN) | ESFUERZO DE COMPRESIÓN (KN/cm ²) | ESFUERZO DE COMPRESIÓN X 0,70 FACTOR CORRECCIÓN RELACION (h/D) | | |
| | | | | | | (Mpa) | (Kg/cm ²) | (Psi) |
| 3-1-C | 3% | 14,95 | 175,54 | 32,3 | 0,184 | 1,29 | 13,13 | 186,82 |
| 3-2-C | 3% | 14,95 | 175,54 | 32,8 | 0,187 | 1,31 | 13,34 | 189,71 |
| 3-3-C | 3% | 14,95 | 175,54 | 33,4 | 0,190 | 1,33 | 13,58 | 193,18 |
| 3-4-C | 3% | 14,95 | 175,54 | 32,7 | 0,186 | 1,30 | 13,30 | 189,13 |
| 6-1-C | 6% | 14,95 | 175,54 | 48,9 | 0,279 | 1,95 | 19,88 | 282,83 |
| 6-2-C | 6% | 14,95 | 175,54 | 46,1 | 0,263 | 1,84 | 18,75 | 266,63 |
| 6-3-C | 6% | 14,95 | 175,54 | 58,6 | 0,334 | 2,34 | 23,83 | 338,93 |
| 6-4-C | 6% | 14,95 | 175,54 | 49,1 | 0,280 | 1,96 | 19,97 | 283,98 |
| 9-1-C | 9% | 14,95 | 175,54 | 64 | 0,365 | 2,55 | 26,02 | 370,16 |
| 9-2-C | 9% | 14,95 | 175,54 | 63,1 | 0,359 | 2,52 | 25,66 | 364,96 |
| 9-3-C | 9% | 14,95 | 175,54 | 60,7 | 0,346 | 2,42 | 24,68 | 351,08 |
| 9-4-C | 9% | 14,95 | 175,54 | 62,9 | 0,358 | 2,51 | 25,58 | 363,80 |
| 12-1-C | 12% | 14,95 | 175,54 | 88,1 | 0,502 | 3,51 | 35,82 | 509,55 |
| 12-2-C | 12% | 14,95 | 175,54 | 84,3 | 0,480 | 3,36 | 34,28 | 487,57 |
| 12-3-C | 12% | 14,95 | 175,54 | 83,7 | 0,477 | 3,34 | 34,04 | 484,10 |
| 12-4-C | 12% | 14,95 | 175,54 | 85,2 | 0,485 | 3,40 | 34,65 | 492,78 |

Tabla 4.42 Resultados del Ensayo de Resistencia a Compresión Simple Edad de Prueba 60 días

|  UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO" FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGON | | | | | | | | |
|---|-----------------------------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|--|---|-----------------------|--------|
| ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE | | | | | | | | |
| Proyecto: Correlación del Modulo de Elasticidad, Resistencia a Compresión y CBR (Valor Soporte California), para un mejoramiento Suelo Cemento de una Arena - Arcillosa | | | | | | | | |
| Universitario: Leonard Horacio Rivero Rocha | | | | | | Edad de Prueba: 60 Dias | | |
| Tipo de Suelo: Arena Arcillosa A-4 ; SC | | | | | | | | |
| Tipo de Cemento: Portland ASTM C-150 "EL PUENTE" SOBOCE | | | | | | Fecha: Mayo de 2015 | | |
| REFERENCIA ASTM D 1633-96 | | | | | | | | |
| ESPECÍMEN N° | DOSIFICACION (% cemento) | DIAMETRO DEL ESPECIMEN (cm) | AREA (cm ²) | CARGA DE COMPRESIÓN (KN) | ESFUERZO DE COMPRESIÓN (KN/cm ²) | ESFUERZO DE COMPRESIÓN X 0,70 FACTOR CORRECCIÓN RELACION (h/D) | | |
| | | | | | | (Mpa) | (Kg/cm ²) | (Psi) |
| 3-1-D | 3% | 14,95 | 175,54 | 35,6 | 0,203 | 1,42 | 14,48 | 205,90 |
| 3-2-D | 3% | 14,95 | 175,54 | 40,1 | 0,228 | 1,60 | 16,31 | 231,93 |
| 3-3-D | 3% | 14,95 | 175,54 | 38,1 | 0,217 | 1,52 | 15,49 | 220,36 |
| 3-4-D | 3% | 14,95 | 175,54 | 39,6 | 0,226 | 1,58 | 16,10 | 229,04 |
| 6-1-D | 6% | 14,95 | 175,54 | 56,3 | 0,321 | 2,25 | 22,89 | 325,63 |
| 6-2-D | 6% | 14,95 | 175,54 | 54,6 | 0,311 | 2,18 | 22,20 | 315,80 |
| 6-3-D | 6% | 14,95 | 175,54 | 55,6 | 0,317 | 2,22 | 22,61 | 321,58 |
| 6-4-D | 6% | 14,95 | 175,54 | 54,5 | 0,310 | 2,17 | 22,16 | 315,22 |
| 9-1-D | 9% | 14,95 | 175,54 | 63,1 | 0,359 | 2,52 | 25,66 | 364,96 |
| 9-2-D | 9% | 14,95 | 175,54 | 72,5 | 0,413 | 2,89 | 29,48 | 419,33 |
| 9-3-D | 9% | 14,95 | 175,54 | 65,5 | 0,373 | 2,61 | 26,63 | 378,84 |
| 9-4-D | 9% | 14,95 | 175,54 | 71,6 | 0,408 | 2,86 | 29,12 | 414,12 |
| 12-1-D | 12% | 14,95 | 175,54 | 115,1 | 0,656 | 4,59 | 46,80 | 665,72 |
| 12-2-D | 12% | 14,95 | 175,54 | 93,5 | 0,533 | 3,73 | 38,02 | 540,79 |
| 12-3-D | 12% | 14,95 | 175,54 | 97,9 | 0,558 | 3,90 | 39,81 | 566,23 |
| 12-4-D | 12% | 14,95 | 175,54 | 114,1 | 0,650 | 4,55 | 46,40 | 659,93 |

Tabla 4.43 Resumen Total de Resultados del Ensayo de Resistencia a Compresión Simple

| | |  UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO" FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGON | | | | | | | |
|--|--------------------------|---|--|--------------------------|--|--------------------------|--|--------------------------|--|
| RESUMEN FINAL DE RESULTADOS ENSAYO RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE | | | | | | | | | |
| Proyecto: | | Correlación del Modulo de Elasticidad, Resistencia a Compresión y CBR (Valor Soporte California), para un mejoramiento Suelo Cemento de una Arena - Arcillosa | | | | | | | |
| Universitario: Leonard Horacio Rivero Rocha | | Tipo de Suelo: Arena Arcillosa A-4 ; SC | | | | | | | |
| Tipo de Cemento: Portland ASTM C-150 "EL PUENTE" SOBOCE | | Fecha: Mayo de 2015 | | | | | | | |
| REFERENCIA AS TMD 1633-96 | | | | | | | | | |
| DENOMINACION | DOSIFICACION (% cemento) | EDAD DE PRUEBA: 3 DIAS | | EDAD DE PRUEBA: 7 DIAS | | EDAD DE PRUEBA: 28 DIAS | | EDAD DE PRUEBA: 60 DIAS | |
| | | CARGA DE COMPRESION (KN) | ESFUERZO DE COMPRESION (Kg/cm ²) | CARGA DE COMPRESION (KN) | ESFUERZO DE COMPRESION (Kg/cm ²) | CARGA DE COMPRESION (KN) | ESFUERZO DE COMPRESION (Kg/cm ²) | CARGA DE COMPRESION (KN) | ESFUERZO DE COMPRESION (Kg/cm ²) |
| 3-1 | 3% | 23,90 | 9,72 | 28,30 | 11,51 | 32,30 | 13,13 | 35,60 | 14,48 |
| 3-2 | 3% | 24,70 | 10,04 | 33,90 | 13,78 | 32,80 | 13,34 | 40,10 | 16,31 |
| 3-3 | 3% | 24,90 | 10,13 | 31,50 | 12,81 | 33,40 | 13,58 | 38,10 | 15,49 |
| 3-4 | 3% | 25,00 | 10,17 | 29,20 | 11,87 | 32,70 | 13,30 | 39,60 | 16,10 |
| 6-1 | 6% | 37,50 | 15,25 | 44,40 | 18,05 | 48,90 | 19,88 | 56,30 | 22,89 |
| 6-2 | 6% | 37,40 | 15,21 | 46,70 | 18,99 | 46,10 | 18,75 | 54,60 | 22,20 |
| 6-3 | 6% | 37,30 | 15,17 | 49,90 | 20,29 | 58,60 | 23,83 | 55,60 | 22,61 |
| 6-4 | 6% | 41,30 | 16,79 | 36,80 | 14,96 | 49,10 | 19,97 | 54,50 | 22,16 |
| 9-1 | 9% | 53,80 | 21,88 | 59,60 | 24,24 | 64,00 | 26,02 | 63,10 | 25,66 |
| 9-2 | 9% | 55,80 | 22,69 | 56,50 | 22,97 | 63,10 | 25,66 | 72,50 | 29,48 |
| 9-3 | 9% | 51,10 | 20,78 | 56,90 | 23,14 | 60,70 | 24,68 | 65,50 | 26,63 |
| 9-4 | 9% | 60,60 | 24,64 | 61,80 | 25,13 | 62,90 | 25,58 | 71,60 | 29,12 |
| 12-1 | 12% | 72,90 | 29,64 | 81,10 | 32,98 | 88,10 | 35,82 | 115,10 | 46,80 |
| 12-2 | 12% | 72,40 | 29,44 | 81,30 | 33,06 | 84,30 | 34,28 | 93,50 | 38,02 |
| 12-3 | 12% | 70,30 | 28,59 | 78,70 | 32,00 | 83,70 | 34,04 | 97,90 | 39,81 |
| 12-4 | 12% | 57,50 | 23,38 | 75,80 | 30,82 | 85,20 | 34,65 | 114,10 | 46,40 |

4.6. ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL C.B.R.

El C.B.R se trata de un ensayo ideado en la Dirección de Carreteras de California, mediante el cual se puede evaluar las posibilidades de sustentación de un cimiento y de esta manera determinar el espesor necesario para la estructura de una carretera.

El ensayo del Valor de Soporte California C.B.R. se procedió de acuerdo a la norma REFERENCIA ASTM D 1883, utilizando los datos de la Humedad Óptima y la Densidad Máxima para cada dosificación obtenida del anterior capítulo del Ensayo de Compactación PROCTOR AASTHO T - 180 ASTM D 1557.

El ensayo consiste en determinar la presión necesaria para que un émbolo de 4,96 cm de diámetro o de 3 pulg² de área penetre un determinado número de milímetros a una velocidad constante de 1,27 mm por minuto, en una probeta de 15 cm (6 pulg) de diámetro y 15,5 cm (5 pulg) de altura; una vez determinada la presión se la relaciona con la presión necesaria para obtener la misma penetración en una muestra patrón.

Las muestras se sumergen en agua durante 96 horas previas a realizarse el ensayo con el fin de simular condiciones de saturación y de esta forma tener los valores de CBR en las condiciones más críticas. El peso que se agrega en la superficie de la probeta de ensayo tiene la finalidad de simular las sobrecargas debidas al peso de la estructura vial.

4.6.1. Preparación de las Muestras

Una vez realizadas las muestras del suelo cemento para diferentes dosificaciones estas se las sumergen en agua para simular condiciones de saturación que serían las más desfavorables (fig.4.62). Se procede con el extensómetro a lecturar las mediciones iniciales para obtener la expansión del material en las próximas 96 hrs. en teoría, para nuestras muestras de suelo cemento se evidenció que al cabo de tres días ya no se presentaba expansión en las mismas entonces se lectura solo 3 medidas, (ver fig. 4.63.)



Figura 4.62 Muestras Suelo Cemento Saturadas



Figura 4.63 Lecturación de la Expansión de la muestra mediante el Extensómetro

Posteriormente cumplidos estos 3 días se los saca y se deja vertiendo el agua durante unos 20 minutos, que escurra toda el agua para luego romperlas en el Tester C.B.R. obteniendo las lecturas de deformación y Carga aplicadas a las probetas mediante la ecuación calibrada del anillo.

4.6.2. Resultados Obtenidos para el C.B.R.

Se pudo observar un fenómeno que ocurría a la hora de romper en el Tester las muestras de suelo cemento en todas sus dosificaciones. Y es que se presenta la restitución del suelo cemento, porque al comienzo de cada ensayo la carga aumentaba considerablemente generalmente hasta la deformación de 2 pulg. Ya que el suelo cemento era en esa fase muy resistente a la carga, pero a partir de esa deformación el mismo se fragmentaba y la deformación aumentaba considerablemente y la carga baja ya que la muestra no estaba haciendo resistencia a la carga. Esto sucedía hasta cierta penetración de deformación hasta que se volvía a restituir y otra vez comenzaba a subir el valor de la fuerza pero esta vez ya muy poco y lentamente (ver fig.4.64).

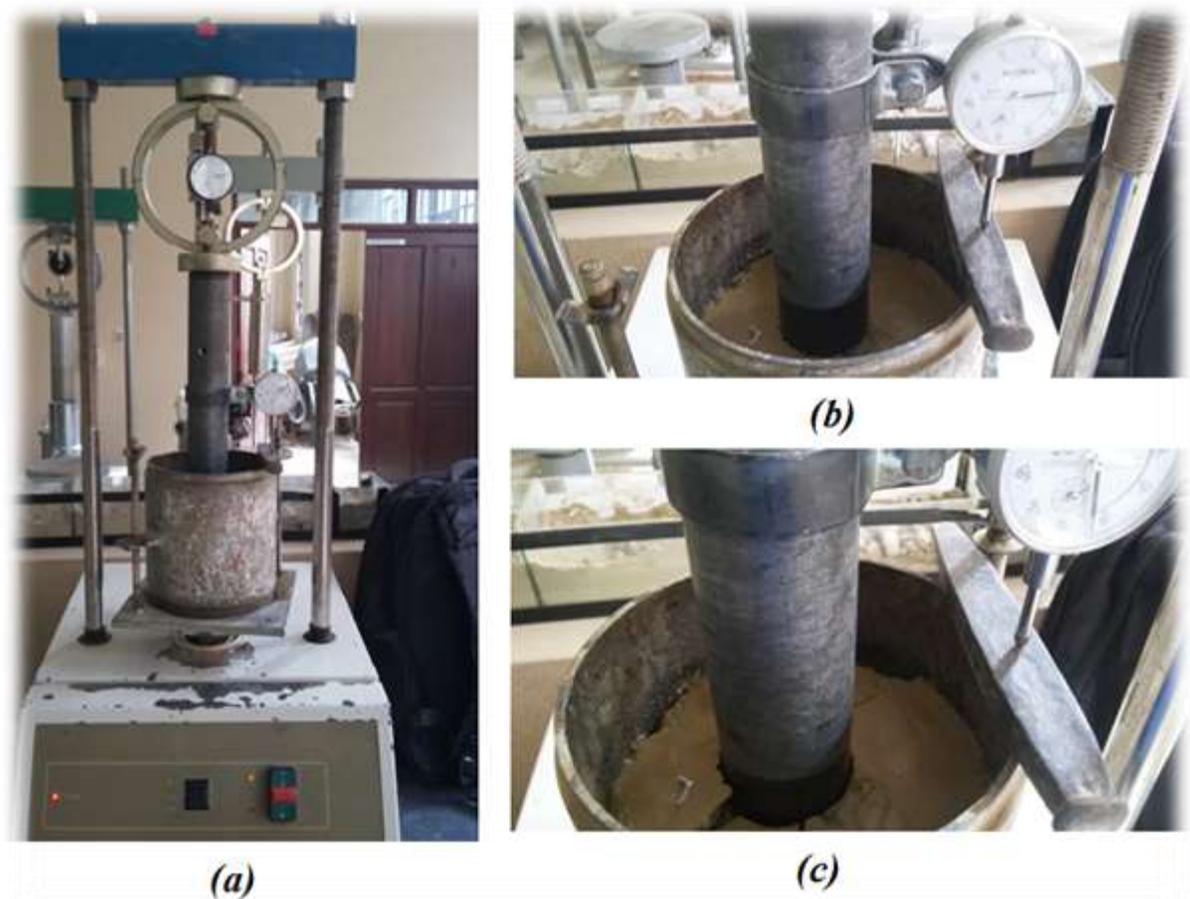


Figura 4.64 (a) Medición de la Carga y Deformación. (b) y (c) Se observa el momento que se produce el fenómeno de la restitución del Suelo – Cemento.

Posteriormente a la ruptura de los moldes de suelo – cemento se toma pequeñas muestras del mismo, de la parte superior, inferior y a 2 pulg. (5.0 cm) de la superficie, se las recolecta en taras para cocerlas en el horno y de esta manera obtener el peso seco y el cálculo del contenido de humedad de dichas muestras, (fig. 4.65).



Figura 4.65 pequeñas muestras secas después del horno

Con estos datos que son los más importantes procedemos a realizar los cálculos respectivos para la determinación del Valor Soporte California C.B.R.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del ensayo del Valor Soporte California para el Suelo – Cemento a diferentes Dosificaciones, (Cálculos completos ver Anexo 9 planilla de Cálculos del Ensayo del Valor Soporte California para el Suelo Cemento).

Tabla 4.44 Resultados Ensayo del Valor Soporte California C.B.R. Edad de Prueba 3 días

|  <p style="text-align: center;"> UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO" FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGON </p> | | | | | | | |
|--|--------------------------|--------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|------------|---------------------------------|--------------------------------|
| ENSAYO "CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)" | | | | | | | |
| Proyecto: Correlación del Modulo de Elasticidad, Resistencia a Compresión y CBR (Valor Soporte California), para un mejoramiento Suelo Cemento de una Arena - Arcillosa | | | | | | | |
| Universitario: Leonard Horacio Rivero Rocha | | | | | | Edad de Prueba: 3 Dias | |
| Tipo de Suelo: Arena Arcillosa A-4 ; SC | | | | | | | |
| Tipo de Cemento: Portland ASTM C-150 "EL PUENTE" SOBOCE | | | | | | Fecha: Marzo de 2015 | |
| REFERENCIA ASTM D 1883 | | | | | | | |
| ESPECÍMEN N° | DOSIFICACION (% cemento) | HUMEDAD OPTIMA (%) | DENSIDAD MAXIMA (Kg/cm ³) | PESO UNITARIO (Kg/cm ³) | C.B.R. (%) | C.B.R. al 100% Dens. Maxima (%) | C.B.R. al 95% Dens. Maxima (%) |
| 3-5-A | 3% | 10,11 | 2,036 | 1,945 | 80,9 | 108 | 76 |
| 3-6-A | 3% | 10,11 | 2,036 | 1,955 | 72,9 | 96 | 66 |
| 6-5-A | 6% | 10,42 | 2,050 | 2,002 | 117,8 | 140 | 87 |
| 6-6-A | 6% | 10,42 | 2,050 | 2,013 | 120,8 | 137 | 86 |
| 9-5-A | 9% | 10,84 | 2,096 | 2,067 | 154,7 | 180 | 93 |
| 9-6-A | 9% | 10,84 | 2,096 | 2,059 | 161,7 | 195 | 93 |
| 12-5-A | 12% | 10,87 | 2,070 | 2,057 | 195,6 | 205 | 88 |
| 12-6-A | 12% | 10,87 | 2,070 | 2,045 | 197,6 | 210 | 142 |

Tabla 4.45 Resultados Ensayo del Valor Soporte California C.B.R. Edad de Prueba 7 días

|  UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO" FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGON | | | | | | | |
|---|--------------------------|--------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|------------|---------------------------------|--------------------------------|
| ENSAYO "CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)" | | | | | | | |
| Proyecto: Correlación del Modulo de Elasticidad, Resistencia a Compresión y CBR (Valor Soporte California), para un mejoramiento Suelo Cemento de una Arena - Arcillosa | | | | | | | |
| Universitario: Leonard Horacio Rivero Rocha | | | | Edad de Prueba: 7 Dias | | | |
| Tipo de Suelo: Arena Arcillosa A-4 ; SC | | | | | | | |
| Tipo de Cemento: Portland ASTM C-150 "EL PUENTE" SOBOCE | | | | Fecha: Marzo de 2015 | | | |
| REFERENCIA ASTM D 1883 | | | | | | | |
| ESPECÍMEN N° | DOSIFICACION (% cemento) | HUMEDAD OPTIMA (%) | DENSIDAD MAXIMA (Kg/cm ³) | PESO UNITARIO (Kg/cm ³) | C.B.R. (%) | C.B.R. al 100% Dens. Maxima (%) | C.B.R. al 95% Dens. Maxima (%) |
| 3-5-B | 3% | 10,11 | 2,036 | 1,989 | 97,8 | 123 | 72 |
| 3-6-B | 3% | 10,11 | 2,036 | 1,988 | 96,8 | 114 | 77 |
| 6-5-B | 6% | 10,42 | 2,050 | 1,964 | 123,8 | 157 | 113 |
| 6-6-B | 6% | 10,42 | 2,050 | 1,982 | 130,8 | 155 | 111 |
| 9-5-B | 9% | 10,84 | 2,096 | 2,047 | 172,7 | 210 | 132 |
| 9-6-B | 9% | 10,84 | 2,096 | 2,049 | 184,6 | 209 | 147 |
| 12-5-B | 12% | 10,87 | 2,070 | 2,025 | 207,6 | 255 | 143 |
| 12-6-B | 12% | 10,87 | 2,070 | 2,034 | 209,6 | 239 | 152 |

Tabla 4.46 Resultados Ensayo del Valor Soporte California C.B.R. Edad de Prueba 28 días

|  | | UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO" FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGON | | | | | |
|---|--------------------------|---|---------------------------------------|-------------------------------------|------------|---------------------------------|--------------------------------|
| ENSAYO "CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)" | | | | | | | |
| Proyecto: Correlación del Modulo de Elasticidad, Resistencia a Compresión y CBR (Valor Soporte California), para un mejoramiento Suelo Cemento de una Arena - Arcillosa | | | | | | | |
| Universitario: Leonard Horacio Rivero Rocha | | | | Edad de Prueba: 28 Dias | | | |
| Tipo de Suelo: Arena Arcillosa A-4 ; SC | | | | | | | |
| Tipo de Cemento: Portland ASTM C-150 "EL PUENTE" SOBOCE | | | | Fecha: Abril de 2015 | | | |
| REFERENCIA ASTM D 1883 | | | | | | | |
| ESPECÍMEN N° | DOSIFICACION (% cemento) | HUMEDAD OPTIMA (%) | DENSIDAD MAXIMA (Kg/cm ³) | PESO UNITARIO (Kg/cm ³) | C.B.R. (%) | C.B.R. al 100% Dens. Maxima (%) | C.B.R. al 95% Dens. Maxima (%) |
| 3-5-B | 3% | 10,11 | 2,036 | 1,960 | 109,8 | 147 | 91 |
| 3-6-B | 3% | 10,11 | 2,036 | 1,997 | 114,8 | 147 | 67 |
| 6-5-B | 6% | 10,42 | 2,050 | 2,006 | 153,7 | 173 | 120 |
| 6-6-B | 6% | 10,42 | 2,050 | 1,983 | 150,7 | 186 | 134 |
| 9-5-B | 9% | 10,84 | 2,096 | 2,013 | 182,7 | 226 | 170 |
| 9-6-B | 9% | 10,84 | 2,096 | 2,022 | 191,6 | 234 | 167 |
| 12-5-B | 12% | 10,87 | 2,070 | 2,018 | 220,6 | 278 | 167 |
| 12-6-B | 12% | 10,87 | 2,070 | 2,019 | 242,5 | 277 | 197 |

Tabla 4.47 Resultados Ensayo del Valor Soporte California C.B.R. Edad de Prueba 60 días

|  <p style="text-align: center;"> UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO" FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGON </p> | | | | | | | |
|--|--------------------------|--------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|------------|---------------------------------|--------------------------------|
| ENSAYO "CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)" | | | | | | | |
| Proyecto: Correlación del Modulo de Elasticidad, Resistencia a Compresión y CBR (Valor Soporte California), para un mejoramiento Suelo Cemento de una Arena - Arcillosa | | | | | | | |
| Universitario: Leonard Horacio Rivero Rocha | | | | | | Edad de Prueba: 60 Dias | |
| Tipo de Suelo: Arena Arcillosa A-4 ; SC | | | | | | | |
| Tipo de Cemento: Portland ASTM C-150 "EL PUENTE" SOBOCE | | | | | | Fecha: Mayo de 2015 | |
| REFERENCIA ASTM D 1883 | | | | | | | |
| ESPECÍMEN N° | DOSIFICACION (% cemento) | HUMEDAD OPTIMA (%) | DENSIDAD MAXIMA (Kg/cm ³) | PESO UNITARIO (Kg/cm ³) | C.B.R. (%) | C.B.R. al 100% Dens. Maxima (%) | C.B.R. al 95% Dens. Maxima (%) |
| 3-5-B | 3% | 10,11 | 2,036 | 1,974 | 125,8 | 174 | 89 |
| 3-6-B | 3% | 10,11 | 2,036 | 1,978 | 123,8 | 168 | 95 |
| 6-5-B | 6% | 10,42 | 2,050 | 2,020 | 175,7 | 195 | 124 |
| 6-6-B | 6% | 10,42 | 2,050 | 2,020 | 188,6 | 208 | 130 |
| 9-5-B | 9% | 10,84 | 2,096 | 2,038 | 204,6 | 247 | 172 |
| 9-6-B | 9% | 10,84 | 2,096 | 2,020 | 210,6 | 256 | 187 |
| 12-5-B | 12% | 10,87 | 2,070 | 2,024 | 248,5 | 300 | 183 |
| 12-6-B | 12% | 10,87 | 2,070 | 2,028 | 262,5 | 292 | 211 |

Tabla 4.48 Resumen Total de Resultados del Valor Soporte California C.B.R.

| | |  UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO" FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGON | | | | | | | |
|--|-----------------------------|---|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| RESUMEN FINAL DE RESULTADOS ENSAYO "CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)" | | | | | | | | | |
| Proyecto: | | Correlación del Modulo de Elasticidad, Resistencia a Compresión y CBR (Valor Soporte California), para un mejoramiento Suelo Cemento de una Arena - Arcillosa | | | | | | | |
| Universitario: Leonard Horacio Rivero Rocha | | Tipo de Suelo: Arena Arcillosa A-4 ; SC | | | | | | | |
| Tipo de Cemento: Portland ASTM C-150 "EL PUENTE" SOBOCE | | Fecha: Mayo de 2015 | | | | | | | |
| REFERENCIA ASTM D 1883 | | | | | | | | | |
| DENOMINACION | DOSIFICACION (% cemento) | EDAD DE PRUEBA: 3 DIAS | | EDAD DE PRUEBA: 7 DIAS | | EDAD DE PRUEBA: 28 DIAS | | EDAD DE PRUEBA: 60 DIAS | |
| | | C.B.R. (%) | C.B.R. al 100% Dens. Maxima (%) | C.B.R. (%) | C.B.R. al 100% Dens. Maxima (%) | C.B.R. (%) | C.B.R. al 100% Dens. Maxima (%) | C.B.R. (%) | C.B.R. al 100% Dens. Maxima (%) |
| 3-5 | 3% | 81 | 108 | 98 | 123 | 110 | 147 | 126 | 174 |
| 3-6 | 3% | 73 | 96 | 97 | 114 | 115 | 147 | 124 | 168 |
| 6-5 | 6% | 118 | 140 | 124 | 157 | 154 | 173 | 176 | 195 |
| 6-6 | 6% | 121 | 137 | 131 | 155 | 151 | 186 | 189 | 208 |
| 9-5 | 9% | 155 | 180 | 173 | 210 | 183 | 226 | 205 | 247 |
| 9-6 | 9% | 162 | 195 | 185 | 209 | 192 | 234 | 211 | 256 |
| 12-5 | 12% | 196 | 205 | 208 | 255 | 221 | 278 | 249 | 300 |
| 12-6 | 12% | 198 | 210 | 210 | 239 | 243 | 277 | 262 | 292 |

5. CAPÍTULO N°5: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para analizar los resultados que se obtuvieron de los ensayos realizados, como se describe en el capítulo anterior, fue necesario realizar un análisis estadístico, por lo que para determinar la relación existentes entre las variables analizadas se utilizó el método estadístico más idóneo. Para poder entender lo realizado en este análisis, a continuación tratamos de describir brevemente la lógica estadística utilizada.

5.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En toda investigación en donde se requiera hacer uso de ensayos o procesos de laboratorio, intervienen una serie de variables en el proceso que afectan los resultados esperados, inclusive cuando se realizan procedimientos normados o estandarizados. Estas discrepancias entre los resultados obtenidos y los resultados esperados se pueden atribuir a factores ambientales, instrumentales, de procedimiento, a los componentes o reactivos utilizados, a la experiencia de quien realiza los ensayos u otras variables que conciente o inconscientemente no se controlan.

Existen técnicas estadísticas que permiten disminuir el impacto de estas discrepancias atribuidas a variables no controladas, mediante un “ajuste” de datos o regresión.

El análisis de regresión nos da la capacidad de representar una serie de datos o de resultados, por medio de un modelo matemático que describa con exactitud su comportamiento respecto a determinadas variables. Dentro de la estadística clásica, el mejor método para ajustar una serie de datos (diagrama de dispersión) a un modelo matemático que describa el fenómeno, es el método de los “mínimos cuadrados”. Este parte de la hipótesis que la distribución de residuos es normal y su varianza es constante. Vale la pena aclarar que el método no arroja el modelo matemático que describa el fenómeno, pero si, ayuda a identificar de entre los posibles modelos matemáticos, aquel que mejor describa los valores obtenidos y a encontrar las constantes que el modelo posee.

La ecuación o modelo matemático utilizado, debe ser propuesto a partir de la observación de los diagramas de dispersión, por lo que es necesario conocer al menos el comportamiento gráfico de las funciones más comunes.

Para el caso de un fenómeno que sea posible describirlo mediante la relación de dos variables (una independiente y una dependiente), el método de los mínimos cuadrados nos ayuda a encontrar la curva que mejor se adapte al diagrama de dispersión, por lo que el modelo matemático (ecuación) debe generar una curva tal que cumpla dos condiciones:

- (1) La suma de las desviaciones verticales (diferencia entre el valor observado y el valor predicho) de los puntos a partir de la recta de ajuste sea nula.

$$\sum (Y_1 - Y) = 0 \quad (1)$$

- (2) La suma de los cuadrados de dichas desviaciones es mínima, es decir ningún otro modelo matemático daría una suma menor de las desviaciones elevadas al cuadrado (mínimo).

$$\sum (Y_1 - Y)^2 \rightarrow 0 \quad (2)$$

Por ejemplo, para el modelo matemático que genera la recta: $Y_R = a + bx$, se tiene que sustituyendo el valor de Y por Y_R en la ecuación 2.

$$\sum (Y_1 - Y_R)^2$$

$$\sum (Y_1 - (a + bx))^2$$

$$\sum (Y_1 - a - bx)^2$$

Si llamamos G a la función que se va a minimizar tenemos que:

$$G = \sum (Y_i - a - bx)^2$$

Para encontrar el valor de los coeficientes de regresión (constantes a y b), que generen que la suma de los cuadrados de las desviaciones sea mínima se debe derivar parcialmente respecto a las constantes obteniéndose el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\frac{dG}{da} \text{ y } \frac{dG}{db}$$

$$\begin{cases} \sum Y = na + b\sum x \\ \sum xy = a\sum x + b\sum x^2 \end{cases}$$

Que puede ser resuelto por cualquier método de resolución de sistemas de ecuaciones. Una vez encontrados los coeficientes de regresión el modelo matemático está completo.

Con el método, es posible tener una medida descriptiva del ajuste global del modelo, por medio del coeficiente de determinación (R^2), que no es más que el cociente entre la variabilidad explicada por la regresión y la variabilidad total, como se muestra en la siguiente expresión:

$$R^2 = \frac{\text{variabilidad explicada}}{\text{variabilidad total}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

De la expresión anterior podemos concluir que el modelo matemático es aceptable cuando $R^2 \rightarrow 1$, es decir, que de entre varios posibles modelos, el que mejor describa los valores observados, será aquel, en cual R^2 se acerque más a la unidad.

De forma análoga, se realiza el procedimiento para modelos matemáticos más complejos.

En los fenómenos que estudia la ingeniería, siempre existen dos o más variables relacionadas, y el interés se centra en modelar y explorar esta relación, con el objetivo

de predecir alguna de ellas a partir de las otras. Por cuestiones prácticas se busca reducir el número de variables independientes, por lo que es común trabajar con sistemas “idealizados” que permitan prescindir de aquellas variables que tengan poca influencia sobre la variable respuesta, todo esto con el objetivo de simplificar el estudio y los procedimientos matemáticos requeridos, por eso es común encontrar relaciones únicamente de dos variables, una independiente y otra dependiente, aunque en condiciones reales intervengan más de una variable independiente.

En algunos casos es necesario relacionar más de dos variables, ya que de alguna de ellas dependen directamente las otras, cuando se presenta esta situación es preciso realizar una **regresión múltiple**.

Para desarrollar el análisis de regresión múltiple también se utiliza el método de mínimos cuadrados, pero se tiene el inconveniente que el procedimiento de cálculo se hace más complejo porque se obtiene un sistema de ecuaciones con un número de ecuaciones igual al número de constantes que posee el modelo evaluado y cada ecuación tiene la posibilidad de tener más de dos variables, por lo que generalmente se utilizan métodos matriciales para resolver los sistemas de ecuaciones generados por el método.

En la investigación el módulo de elasticidad dinámico, la resistencia a la compresión simple y el valor soporte california C.B.R. fueron determinados mediante procedimientos de laboratorio, por lo tanto son variables respuesta o variables dependientes. Según lo observado, los resultados obtenidos están en función de la edad de la probeta y al mismo tiempo están en función del porcentaje de cemento en peso contenido en la mezcla de suelo cemento, ambas variables fueron especificadas previas a la investigación, por lo que ambas se definen como variables independientes o variables regresoras.

Ante las condiciones presentes, se realizará una regresión múltiple de dos variables independientes (Edad y porcentaje de cemento), como ya se mencionó antes, los cálculos requeridos para evaluar cada uno de los posibles modelos matemáticos presentan cierto grado de complejidad, por lo que es recomendable utilizar algún

software capaz de realizarlos, en la investigación se realizaron los cálculos con la ayuda de dos programas Estadísticos como ser: “STATGRAPHICS” y el “SPSS Statistics”.

5.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS OBTENIDOS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

5.2.1. Correlación Múltiple entre las tres variables a través del Software Estadístico

Primeramente para el análisis Estadístico se realiza la correlación Múltiple para las tres variables en este caso vendrían a ser:

- Variable Dependiente = Modulo de Elasticidad Dinámico (Kg/cm²)
- Variables Independientes = Dosificación (%) y la Edad de Prueba (días)

Esto para verificar si los datos siguen una tendencia normal de ajuste, si cumplen con los parámetros estadísticos más importantes, y saber si hay correlación entre la variable dependiente con las variables independientes, así de esta manera se pueda aplicar la Regresión Múltiple para obtener un modelo matemático que se ajuste lo más preciso posible a los resultados obtenidos en laboratorio.

Aplicando un **Análisis Multivariado (Correlaciones)**, con la ayuda del software estadístico tenemos las siguientes tablas de Resultados:

Tabla 5.49 Resumen Estadístico del Análisis Multivariado para el Modulo de Elasticidad

| | <i>Módulo de Elasticidad</i> | <i>Dosificación</i> | <i>Edad de Prueba</i> |
|---------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Recuento | 64 | 64 | 64 |
| Promedio | 33601,0 | 7,5 | 24,5 |
| Desviación Estándar | 9672,74 | 3,38062 | 22,7673 |
| Coefficiente de Variación | 28,787% | 45,0749% | 92,9277% |
| Mínimo | 14341,1 | 3,0 | 3,0 |
| Máximo | 58039,8 | 12,0 | 60,0 |
| Rango | 43698,6 | 9,0 | 57,0 |
| Sesgo Estandarizado | 1,18949 | 0 | 2,13912 |
| Curtosis Estandarizada | -0,423449 | -2,24146 | -1,92241 |

Esta tabla 5.49 muestra el resumen estadístico para cada una de las variables seleccionadas. Incluye medidas de tendencia central, de variabilidad, y de forma. De particular interés aquí es el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden usarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, las cuales tenderían a invalidar muchos de los procedimientos estadísticos que se aplican habitualmente a estos datos.

En este caso, las siguientes variables muestran valores de sesgo estandarizado y de curtosis estandarizada fuera del rango esperado:

Edad de Prueba

Las siguientes variables muestran curtosis estandarizada fuera del rango esperado:

Dosificación

Nota: Existen variables que se encontrarían fuera de Rango, si bien están levemente por fuera del rango estas no afectarían de manera sobresaliente en el ajuste del modelo ya que estas son las variables independientes. Tendríamos que ver la tabla de resultados de correlación para tomar una decisión si aplicamos un modelo matemático o no sería factible el mismo.

Tabla 5.50 Correlaciones del Análisis Multivariado para el Modulo de Elasticidad

| | Módulo de Elasticidad | Dosificación | Edad de Prueba |
|-----------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Módulo de Elasticidad | | 0,8326 | 0,3751 |
| | | (64) | (64) |

| | | | |
|----------------|--------|--------|--------|
| | | 0,0000 | 0,0023 |
| Dosificación | 0,8326 | | 0,0000 |
| | (64) | | (64) |
| | 0,0000 | | 1,0000 |
| Edad de Prueba | 0,3751 | 0,0000 | |
| | (64) | (64) | |
| | 0,0023 | 1,0000 | |

1° Fila: Correlación

2° Fila: (Tamaño de Muestra)

3° Fila: Valor-P

Esta tabla 5.50 muestra las correlaciones, momento producto de Pearson, entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables. También se muestra, entre paréntesis, el número de pares de datos utilizados para calcular cada coeficiente. El tercer número en cada bloque de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0,05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0%. Los siguientes pares de variables tienen valores-P por debajo de 0,05:

Módulo de Elasticidad y Dosificación

Módulo de Elasticidad y Edad de Prueba

Esta tabla nos indica una buena correlación entre la variable dependiente: Modulo de Elasticidad y las variables independientes: Dosificación y Edad de Prueba. Entonces podemos generar mediante una regresión múltiple un modelo matemático que ajuste estos datos sin problema y con una confiabilidad aceptable.

También debemos tomar en cuenta en este análisis que no debe haber en lo posible correlación o debe haber una baja correlación entre las variables independientes, porque de lo contrario si se asocian entre ellas estaríamos ante un problema de colinealidad y podemos tener problemas en el modelo matemático. Por lo que se puede observar no hay correlación entre las mismas por tanto podemos generar nuestro modelo matemático.

5.2.2. Regresión Múltiple no Lineal para las tres variables a través del Software Estadístico

Aplicando el método estadístico de la Regresión Múltiple no Lineal para las tres variables mencionadas anteriormente, mediante el software estadístico se obtienen los siguientes resultados:

Método de estimación: Marquardt

La estimación se detuvo debido a la convergencia de la suma de cuadrados de residuos.

Número de iteraciones: 4

Número de llamadas de la función: 34

Tabla 5.51 Resultados de la Estimación para el modelo matemático de la variable Módulo de Elasticidad

| | | | <i>Intervalo Confianza a 95,0%</i> | |
|------------------|-----------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------|
| | | <i>Error Estándar</i> | <i>Asintótico</i> | |
| <i>Parámetro</i> | <i>Estimado</i> | <i>Asintótico</i> | <i>Inferior</i> | <i>Superior</i> |
| A | 7093,35 | 2882,47 | 1321,28 | 12865,4 |
| B | 679,428 | 786,609 | -895,732 | 2254,59 |
| C | 471,421 | 101,361 | 268,449 | 674,392 |
| D | 129,565 | 50,7047 | 28,0304 | 231,099 |
| E | -3,75758 | 1,39426 | -6,54954 | -0,965618 |
| F | -9,82155 | 6,02314 | -21,8827 | 2,2396 |
| G | 7094,01 | -1,#IND | -1,#IND | -1,#IND |

R-Cuadrada = 87,1117 por ciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 85,755 por ciento

Error estándar del est. = 3650,74

Error medio absoluto = 2480,78

Estadístico Durbin-Watson = 2,66299

Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,342424

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión no lineal para describir la relación entre Modulo de Elasticidad y 2 variables independientes.

Al realizar el ajuste, el proceso de estimación terminó exitosamente después de 4 iteraciones, en este punto los coeficientes estimados convergieron con los estimados actuales.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 87,1117% de la variabilidad en Modulo de Elasticidad. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes es 85,755%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 3650,74.

Podemos observar en los resultados que el modelo matemático tiene una correlación ajustada cuadrada de $R^2 \rightarrow 87.1117\%$ lo que indica que hay una buena correlación entre las variables ajustadas.

5.2.3. Obtención de la Gráfica y Ecuación Matemática del Modelo Estadístico

En la siguiente figura se muestran los diagramas de dispersión para los resultados obtenidos de módulo de elasticidad dinámico.

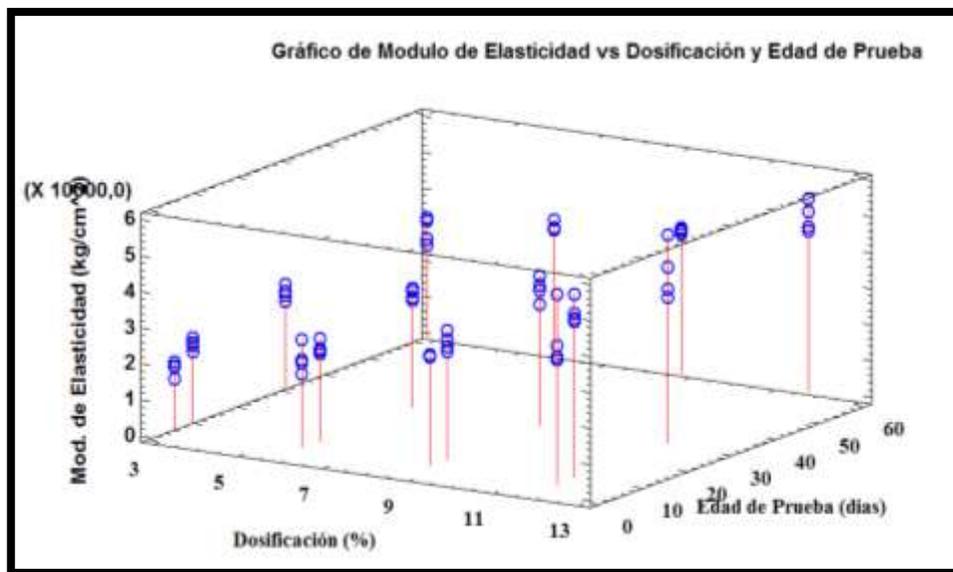


Figura 5.66 Diagrama de Dispersión: Mod. Elasticidad-Dosificación-Edad Prueba

En el diagrama de dispersión se puede observar que la nube de puntos sugiere una superficie, por lo tanto se debe buscar el modelo matemático que genere la superficie que mejor describa el comportamiento de los resultados de módulo de elasticidad dinámico.

El modelo matemático encontrado que mejor se ajustó al diagrama de dispersión fue el siguiente:

$$Y = A + B * X_1 + C * X_2 + D * X_1^2 + E * X_2^2 + F * X_1 * X_2 + G$$

Dónde:

Y = Módulo de Elasticidad Dinámico (kg/cm²)

X1 = Dosificación (%)

X2 = Edad de Prueba (días)

El cual generó la superficie de ajuste que se muestra a continuación:

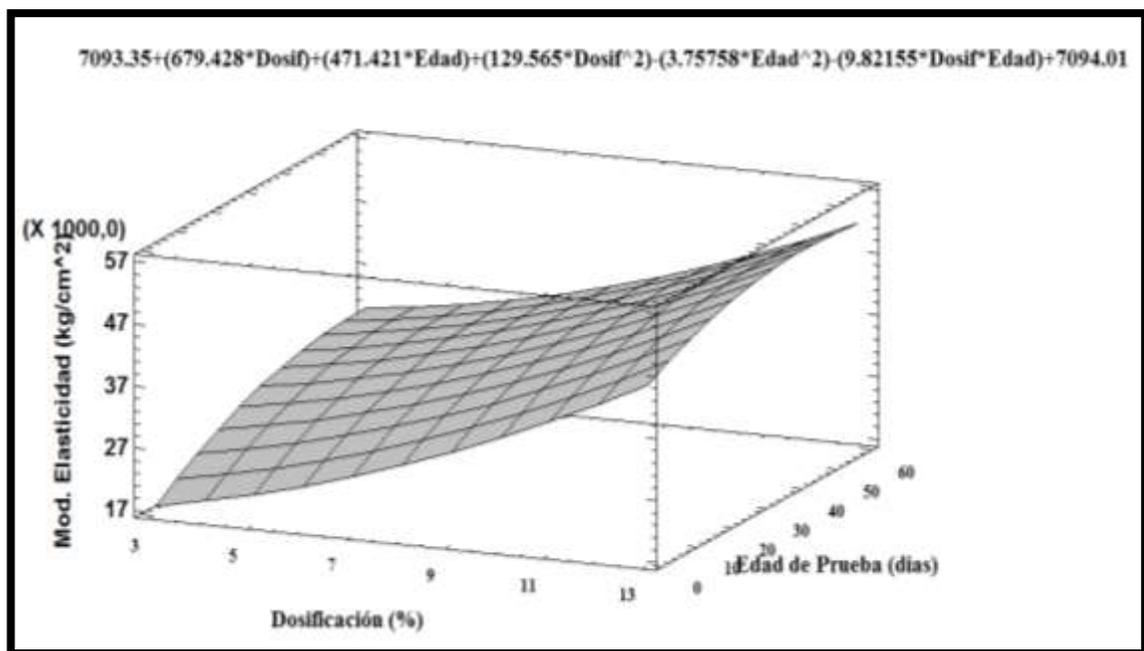


Figura 5.67 Superficie de Ajuste y ecuación generada por el Modelo Matemático

Ecuación:

$$7093.35+(679.428*Dosif)+(471.421*Edad)+(129.565*Dosif^2)-(3.75758*Edad^2)-(9.82155*Dosif*Edad)+7094.01$$

El ajuste con el modelo anterior generó un coeficiente de determinación múltiple (R^2) = 0.87, es decir se obtuvo un porcentaje de imprecisión en el ajuste de 13% y los valores de las constantes que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.52 Coeficientes del modelo de Ajuste para el Módulo de Elasticidad

| | |
|-----|-----------|
| A = | 7093,35 |
| B = | 679,428 |
| C = | 471,421 |
| D = | 129,565 |
| E = | - 3,75758 |
| F = | -9,82155 |
| G = | 7094,01 |

5.3. AJUSTE ESTADÍSTICO DE RESULTADOS OBTENIDOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

5.3.1. Correlación Múltiple entre las tres variables a través del Software Estadístico

Primeramente para el análisis Estadístico se realiza la correlación Múltiple para las tres variables en este caso vendrían a ser:

- Variable Dependiente = Resistencia a Compresión (Kg/cm²)
- Variables Independientes = Dosificación (%) y la Edad de Prueba (días)

Esto para verificar si los datos siguen una tendencia normal de ajuste y si cumplen con los parámetros estadísticos más importantes, y saber si hay correlación entre la variable dependiente con las variables independientes así de esta manera se pueda aplicar la Regresión Múltiple para obtener un modelo matemático que se ajuste lo más preciso posible a los resultados obtenidos en laboratorio.

Aplicando un **Análisis Multivariado (Correlaciones)**, con la ayuda del software estadístico tenemos las siguientes tablas de Resultados:

Tabla 5.53 Resumen Estadístico del Análisis Multivariado para la Resistencia a Compresión

| | <i>Resistencia a Compresión Simple</i> | <i>Dosificación</i> | <i>Edad de Prueba</i> |
|---------------------------|--|---------------------|-----------------------|
| Recuento | 64 | 64 | 64 |
| Promedio | 22,8248 | 7,5 | 24,5 |
| Desviación Estándar | 8,7798 | 3,38062 | 22,7673 |
| Coefficiente de Variación | 38,466% | 45,0749% | 92,9277% |
| Mínimo | 9,72 | 3,0 | 3,0 |
| Máximo | 46,8 | 12,0 | 60,0 |
| Rango | 37,08 | 9,0 | 57,0 |
| Sesgo Estandarizado | 2,11492 | 0 | 2,13912 |
| Curtosis Estandarizada | 0,208235 | -2,24146 | -1,92241 |

Esta tabla 5.53 muestra el resumen estadístico para cada una de las variables seleccionadas. Incluye medidas de tendencia central, de variabilidad, y de forma. De particular interés aquí es el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden usarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, las cuales tenderían a invalidar muchos de los procedimientos estadísticos que se aplican habitualmente a estos datos. En este caso, las siguientes variables muestran valores de sesgo estandarizado y de curtosis estandarizada fuera del rango esperado:

Resistencia a Compresión Simple

Edad de Prueba

Las siguientes variables muestran curtosis estandarizada fuera del rango esperado:

Dosificación

Nota: Existen variables que se encontrarían fuera de Rango, si bien están levemente por fuera del rango estas no afectarían de manera sobresaliente en el ajuste del modelo ya que estos valores son muy pequeños por encima de dicho rango. Tendríamos que ver la tabla de resultados de correlación para tomar una decisión si aplicamos un modelo matemático o no sería factible el mismo.

Tabla 5.54 Correlaciones del Análisis Multivariado para la Resistencia a Compresión

| | Resistencia a Compresión Simple | Dosificación | Edad de Prueba |
|---------------------------------|---------------------------------|--------------|----------------|
| Resistencia a Compresión Simple | | 0,9010 | 0,3287 |
| | | (64) | (64) |
| | | 0,0000 | 0,0080 |
| Dosificación | 0,9010 | | 0,0000 |
| | (64) | | (64) |
| | 0,0000 | | 1,0000 |
| Edad de Prueba | 0,3287 | 0,0000 | |
| | (64) | (64) | |
| | 0,0080 | 1,0000 | |

1° Fila: Correlación

2° Fila: (Tamaño de Muestra)

3° Fila: Valor-P

Esta tabla 5.54 muestra las correlaciones momento producto de Pearson, entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables. También se muestra, entre paréntesis, el número de pares de datos utilizados para calcular cada coeficiente. El tercer número en cada bloque de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0,05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0%. Los siguientes pares de variables tienen valores-P por debajo de 0,05:

Resistencia a Compresión Simple y Dosificación

Resistencia a Compresión Simple y Edad de Prueba

Esta tabla nos indica una buena correlación entre la variable dependiente: Resistencia a la Compresión y las variables independientes: Dosificación y Edad de Prueba. Entonces podemos generar mediante una regresión múltiple un modelo matemático que ajuste estos datos sin problema y con una confiabilidad aceptable.

También debemos tomar en cuenta en este análisis que no debe haber en lo posible correlación o debe haber una baja correlación entre las variables independientes, porque de lo contrario si se asocian entre ellas estaríamos ante un problema de colinealidad y podemos tener problemas en el modelo matemático. Por lo que se puede

observar no hay correlación entre las mismas por tanto podemos generar nuestro modelo matemático.

5.3.2. Regresión Múltiple no Lineal para las tres variables a través del Software Estadístico

Aplicando el método estadístico de la Regresión Múltiple no Lineal para las tres variables mencionadas anteriormente, mediante el software estadístico se obtienen los siguientes resultados:

Método de estimación: Marquardt

La estimación se detuvo debido a la convergencia de la suma de cuadrados de residuos.

Número de iteraciones: 4

Número de llamadas de la función: 34

Tabla 5.55 Resultados de la Estimación para el modelo matemático de la variable Resistencia a Compresión

| | | | <i>Intervalo Confianza a 95,0%</i> | |
|------------------|-----------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------|
| | | <i>Error Estándar</i> | <i>Asintótico</i> | |
| <i>Parámetro</i> | <i>Estimado</i> | <i>Asintótico</i> | <i>Inferior</i> | <i>Superior</i> |
| A | 4,157 | 1,70232 | 0,748168 | 7,56584 |
| B | 0,67647 | 0,464551 | -0,25378 | 1,60672 |
| C | 0,0819574 | 0,0598609 | -0,0379123 | 0,201827 |
| D | 0,0871354 | 0,0299449 | 0,0271717 | 0,147099 |
| E | -0,00101412 | 0,000823415 | -0,00266299 | 0,000634739 |
| F | 0,0145518 | 0,00355711 | 0,00742883 | 0,0216748 |
| G | 4,15701 | -1,#IND | -1,#IND | -1,#IND |

-Cuadrada = 94,544 %

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 93,9697 %

Error estándar del est. = 2,15603

Error medio absoluto = 1,43811

Estadístico Durbin-Watson = 1,67235

Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,0970602

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión no lineal para describir la relación entre Resistencia a Compresión Simple y 2 variables independientes.

Al realizar el ajuste, el proceso de estimación terminó exitosamente después de 4 iteraciones, en este punto los coeficientes estimados convergieron con los estimados actuales.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 94,544% de la variabilidad en Resistencia a Compresión Simple. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes es 93,9697%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 2,15603.

Podemos observar en los resultados que el modelo matemático tiene una correlación ajustada cuadrada de $R^2 \rightarrow 94,544\%$ lo que indica que hay una buena correlación entre las variables ajustadas.

5.3.3. Obtención de la Gráfica y Ecuación Matemática del Modelo Estadístico

En la siguiente figura se muestran los diagramas de dispersión para los resultados obtenidos de la Resistencia a Compresión Simple.

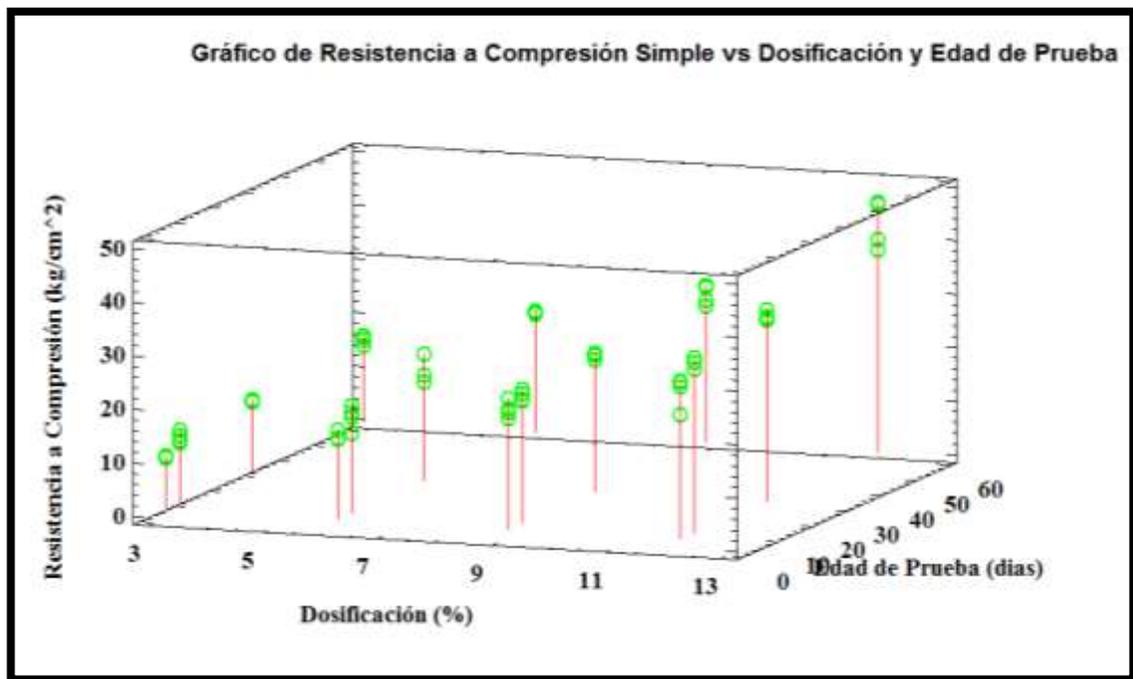


Figura 5.68 Diagrama de Dispersión: Resistencia Compresión-Dosificación-Edad Prueba

En el diagrama de dispersión se puede observar que la nube de puntos sugiere una superficie, por lo tanto se debe buscar el modelo matemático que genere la superficie que mejor describa el comportamiento de los resultados de la resistencia a Compresión.

El modelo matemático encontrado que mejor se ajustó al diagrama de dispersión fue el siguiente:

$$Y = A + B * X_1 + C * X_2 + D * X_1^2 + E * X_2^2 + F * X_1 * X_2 + G$$

Dónde:

Y = Resistencia a compresión (kg/cm²)

X1 = Dosificación (%)

X2 = Edad de Prueba (días)

El cual generó la superficie de ajuste que se muestra a continuación:

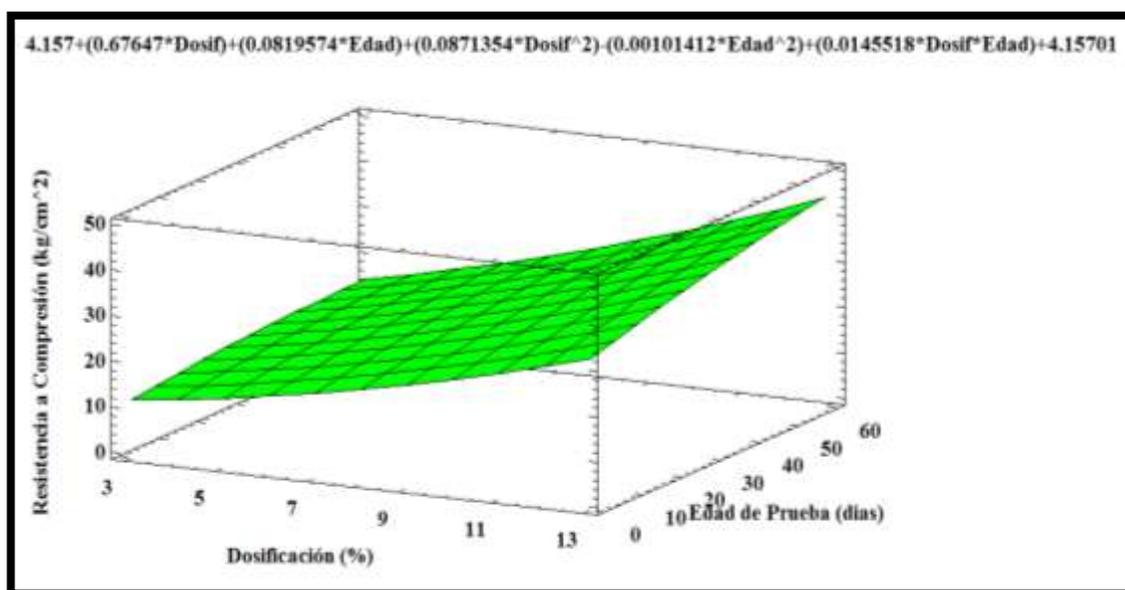


Figura 5.69 Superficie de Ajuste y ecuación generada por la Resistencia a Compresión

Ecuación:

$$4.157+(0.67647*\text{Dosif})+(0.0819574*\text{Edad})+(0.0871354*\text{Dosif}^2)-(0.00101412*\text{Edad}^2)+(0.0145518*\text{Dosif}*\text{Edad})+4.15701$$

El ajuste con el modelo anterior generó un coeficiente de determinación múltiple (R^2) = 0.94 es decir se obtuvo un porcentaje de imprecisión en el ajuste de 6% y los valores de las constantes que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.56 Coeficientes del modelo de Ajuste para la Resistencia a Compresión

| | |
|-----|-------------|
| A = | 4,157 |
| B = | 0,67647 |
| C = | 0,0819574 |
| D = | 0,0871354 |
| E = | -0,00101412 |
| F = | 0,0145518 |
| G = | 4,15701 |

5.4.AJUSTE ESTADISTICO DE RESULTADOS OBTENIDOS DEL CBR (VALOR SOPORTE CALIFORNIA)

5.4.1. Correlación Múltiple entre las tres variables a través del Software Estadístico

Primeramente para el análisis Estadístico se realiza la correlación Múltiple para las tres variables en este caso vendrían a ser:

- Variable Dependiente = Valor Soporte California CBR (%)
- Variables Independientes = Dosificación (%) y la Edad de Prueba (días)

Esto para verificar si los datos siguen una tendencia normal de ajuste y si cumplen con los parámetros estadísticos más importantes, y saber si hay correlación entre la variable dependiente con las variables independientes así de esta manera se pueda aplicar la Regresión Múltiple para obtener un modelo matemático que se ajuste lo más preciso posible a los resultados obtenidos en laboratorio.

Aplicando un **Análisis Multivariado (Correlaciones)**, con la ayuda del software estadístico tenemos las siguientes tablas de Resultados:

Tabla 5.57 Resumen Estadístico del Análisis Multivariado para el CBR

| | <i>Valor Soporte California C.B.R.</i> | <i>Dosificación</i> | <i>Edad de Prueba</i> |
|---------------------------|--|---------------------|-----------------------|
| Recuento | 32 | 32 | 32 |
| Promedio | 195,031 | 7,5 | 24,5 |
| Desviación Estándar | 55,2183 | 3,40777 | 22,9502 |
| Coefficiente de Variación | 28,3126% | 45,4369% | 93,6741% |
| Mínimo | 96,0 | 3,0 | 3,0 |
| Máximo | 300,0 | 12,0 | 60,0 |
| Rango | 204,0 | 9,0 | 57,0 |
| Sesgo Estandarizado | 0,319259 | 0 | 1,55055 |
| Curtosis Estandarizada | -0,889267 | -1,5997 | -1,3547 |

Esta tabla 5.57 muestra el resumen estadístico para cada una de las variables seleccionadas. Incluye medidas de tendencia central, de variabilidad, y de forma. De particular interés aquí es el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden usarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, las cuales tenderían a invalidar muchos de los procedimientos estadísticos que se aplican habitualmente a estos datos. En este caso,

las siguientes variables muestran valores de sesgo estandarizado y de curtosis estandarizada fuera del rango esperado:

<Ninguna>

Las siguientes variables muestran curtosis estandarizada fuera del rango esperado:

<Ninguna>

Nota: No existen variables que se encuentren fuera de Rango, de todos modos debemos verificar con la tabla de resultados de correlación para tomar una decisión si aplicamos un modelo matemático o no sería factible el mismo.

Tabla 5.58 Correlaciones del Análisis Multivariado para el CBR

| | Valor Soporte California C.B.R. | Dosificación | Edad de Prueba |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------|----------------|
| Valor Soporte California C.B.R. | | 0,8596 (32) | 0,4645 (32) |
| | | 0,0000 | 0,0074 |
| Dosificación | 0,8596 (32) | | 0,0000 (32) |
| | 0,0000 | | 1,0000 |
| Edad de Prueba | 0,4645 (32) | 0,0000 (32) | |
| | 0,0074 | 1,0000 | |

1° Fila: Correlación

2° Fila: (Tamaño de Muestra)

3° Fila: Valor-P

Esta tabla 5.58 muestra las correlaciones momento producto de Pearson, entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables. También se muestra, entre paréntesis, el número de pares de datos utilizados para calcular cada coeficiente. El tercer número en cada bloque de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0,05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0%. Los siguientes pares de variables tienen valores-P por debajo de 0,05:

Valor Soporte California C.B.R. y Dosificación

Valor Soporte California C.B.R. y Edad de Prueba

Esta tabla nos indica una buena correlación entre la variable dependiente: Valor Soporte California CBR y las variables independientes: Dosificación y Edad de Prueba. Entonces podemos generar mediante una regresión múltiple un modelo matemático que ajuste estos datos sin problema y con una confiabilidad aceptable.

También debemos tomar en cuenta en este análisis que no debe haber en lo posible correlación o debe haber una baja correlación entre las variables independientes, porque de lo contrario si se asocian entre ellas estaríamos ante un problema de colinealidad y podemos tener problemas en el modelo matemático. Por lo que se puede observar no hay correlación entre las mismas por tanto podemos generar nuestro modelo matemático.

5.4.2. Regresión Múltiple no Lineal para las tres variables a través del Software Estadístico

Aplicando el método estadístico de la Regresión Múltiple no Lineal para las tres variables mencionadas anteriormente, mediante el software estadístico se obtienen los siguientes resultados:

Método de estimación: Marquardt

La estimación se detuvo debido a la convergencia de la suma de cuadrados de residuos.

Número de iteraciones: 4

Número de llamadas de la función: 34

Tabla 5.59 Resultados de la Estimación para el modelo matemático de la variable CBR

| | | | | |
|--|--|-----------------------|------------------------------|--------------|
| | | | <i>Intervalo Confianza a</i> | <i>95,0%</i> |
| | | <i>Error Estándar</i> | <i>Asintótico</i> | |

| <i>Parámetro</i> | <i>Estimado</i> | <i>Asintótico</i> | <i>Inferior</i> | <i>Superior</i> |
|------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| A | 30,4267 | 11,4492 | 6,84649 | 54,0069 |
| B | 12,1894 | 3,12443 | 5,75455 | 18,6243 |
| C | 2,34398 | 0,402606 | 1,5148 | 3,17317 |
| D | 0,0868057 | 0,2014 | -0,327986 | 0,501598 |
| E | -0,0214428 | 0,00553803 | -0,0328486 | -0,010037 |
| F | 0,017863 | 0,023924 | -0,0314096 | 0,0671355 |
| G | 30,4267 | -1,#IND | -1,#IND | -1,#IND |

R-Cuadrada = 97,2192 %

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 96,5518 %

Error estándar del est. = 10,2536

Error medio absoluto = 6,95738

Estadístico Durbin-Watson = 1,4577

Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,26672

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión no lineal para describir la relación entre Valor Soporte California C.B.R. y 2 variables independientes.

Al realizar el ajuste, el proceso de estimación terminó exitosamente después de 4 iteraciones, en este punto los coeficientes estimados convergieron con los estimados actuales.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 97,2192% de la variabilidad en Valor Soporte California C.B.R. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes es 96,5518%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 10,2536.

Podemos observar en los resultados que el modelo matemático tiene una correlación ajustada cuadrada de $R^2 \rightarrow 97,2190\%$ lo que indica que hay una buena correlación entre las variables ajustadas.

5.4.3. Obtención de la Gráfica y Ecuación Matemática del Modelo Estadístico

En la siguiente figura se muestran los diagramas de dispersión para los resultados obtenidos del Valor Soporte California C.B.R.:

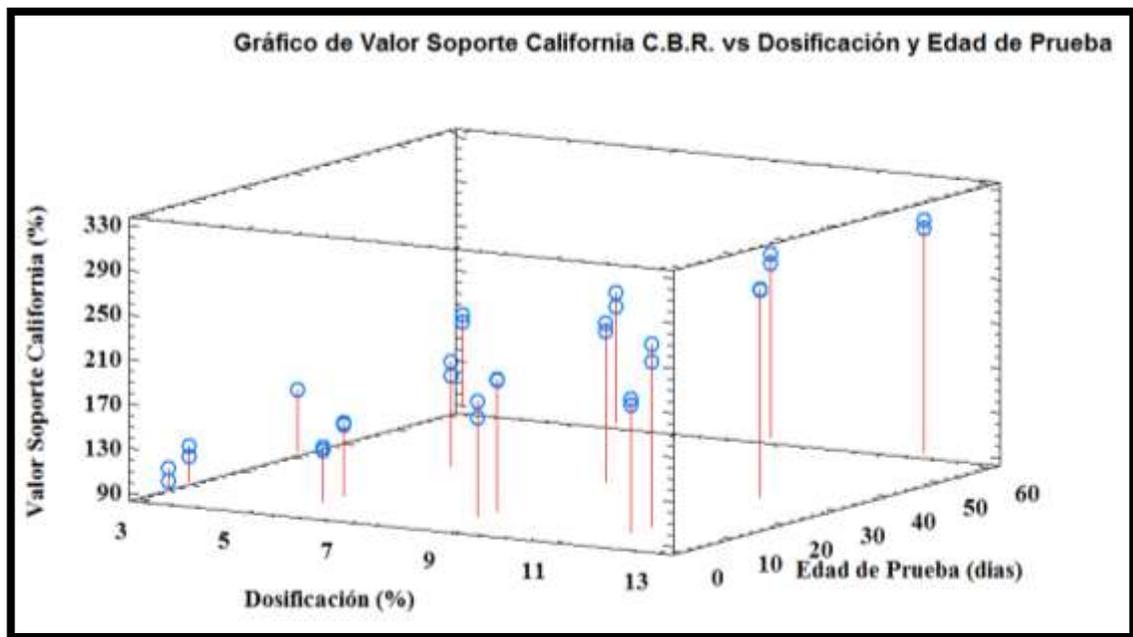


Figura 5.70 Diagrama de Dispersión: CBR-Dosificación-Edad Prueba

En el diagrama de dispersión se puede observar que la nube de puntos sugiere una superficie, por lo tanto se debe buscar el modelo matemático que genere la superficie que mejor describa el comportamiento de los resultados de la resistencia a Compresión.

El modelo matemático encontrado que mejor se ajustó al diagrama de dispersión fue el siguiente:

$$Y = A + B * X_1 + C * X_2 + D * X_1^2 + E * X_2^2 + F * X_1 * X_2 + G$$

Dónde:

Y = CBR Valor Soporte California (%)

X1 = Dosificación (%)

X2 = Edad de Prueba (días)

El cual generó la superficie de ajuste que se muestra a continuación:

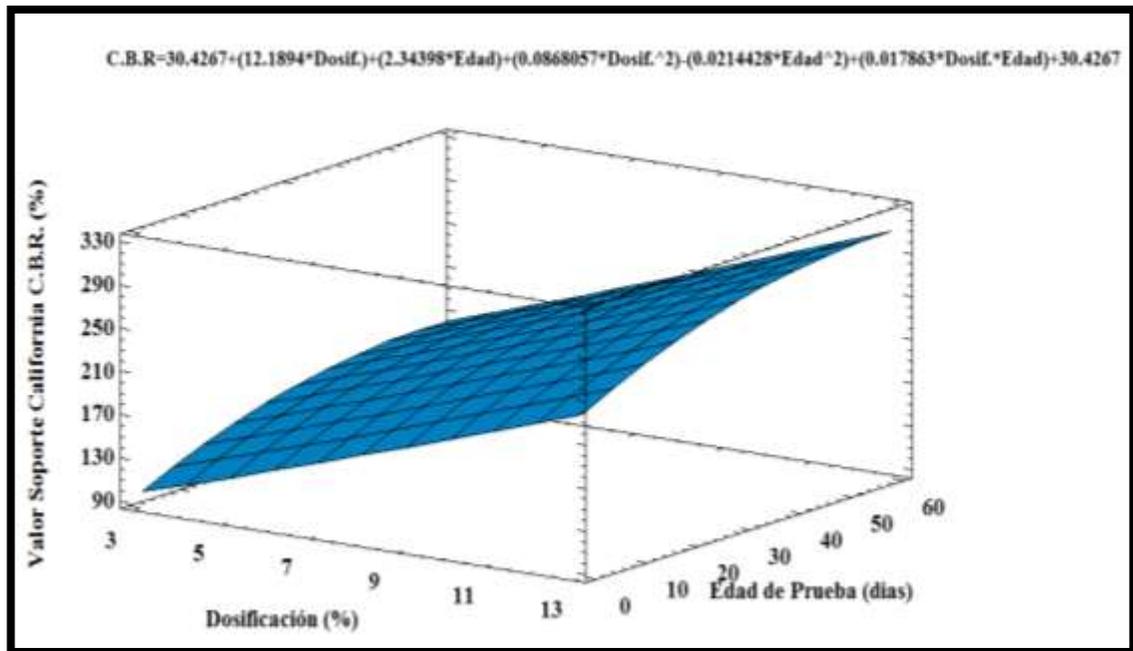


Figura 5.71 Superficie de Ajuste y ecuación generada por el Valor Soporte california CBR

$$C.B.R.=30.4267+(12.1894*Dosif.)+(2.34398*Edad)+(0.0868057*Dosif.^2)-(0.0214428*Edad^2)+(0.017863*Dosif.*Edad)+30.4267$$

El ajuste con el modelo anterior generó un coeficiente de determinación múltiple (R^2) = 0.97 es decir se obtuvo un porcentaje de imprecisión en el ajuste del 3% y los valores de las constantes que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.60 Coeficientes del modelo de Ajuste para el C.B.R.

| | |
|-----|---------|
| A = | 30,4267 |
|-----|---------|

| | |
|-----|------------|
| B = | 12,1894 |
| C = | 2,34398 |
| D = | 0,0868057 |
| E = | -0,0214428 |
| F = | 0,017863 |
| G = | 30,4267 |

5.5.CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD, RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y EL CBR (VALOR SOPORTE CALIFORNIA)

La correlación indica la fuerza y la dirección de una relación lineal entre dos variables aleatorias. La correlación es una medida sobre el grado de relación entre dos variables, sin importar cuál es la causa y cuál es el efecto. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra.

Con las tres variables calculadas, es posible relacionarlas entre si y observar si existe correlación entre ellas.

5.5.1. Correlación Múltiple entre las tres variables a través del Software Estadístico

Primeramente para el análisis Estadístico se realiza la correlación Múltiple para las tres variables en este caso vendrían a ser:

- Módulo de Elasticidad Dinámico (kg/cm²)
- Resistencia a Compresión Simple (kg/cm²)
- Valor Soporte California CBR (%)

Esto para verificar si los datos siguen una tendencia normal de ajuste y si cumplen con los parámetros estadísticos más importantes, y saber si hay correlación entre la variable dependiente con las variables independientes así de esta manera se pueda aplicar la Regresión Múltiple para obtener un modelo matemático que se ajuste lo más preciso posible a los resultados obtenidos en laboratorio.

Aplicando un **Análisis Multivariado (Correlaciones)**, con la ayuda del software estadístico tenemos las siguientes tablas de Resultados:

Tabla 5.61 Resumen Estadístico del Análisis Multivariado

| | Valor Soporte California C.B.R. | Resistencia a Compresión Simple | Módulo de Elasticidad |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| Recuento | 32 | 32 | 32 |
| Promedio | 195,031 | 22,8803 | 33286,2 |
| Desviación Estándar | 55,2183 | 8,97469 | 10277,8 |
| Coefficiente de Variación | 28,31% | 39,22% | 30,88% |
| Mínimo | 96 | 9,72 | 14341,1 |
| Máximo | 300 | 46,8 | 58039,8 |
| Rango | 204 | 37,08 | 43698,6 |
| Sesgo Estandarizado | 0,319259 | 1,47154 | 1,12209 |
| Curtosis Estandarizada | -0,889267 | 0,110609 | -0,140797 |

Esta tabla 5.61 muestra el resumen estadístico para cada una de las variables seleccionadas. Incluye medidas de tendencia central, de variabilidad, y de forma. De particular interés aquí es el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden usarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, las cuales tenderían a invalidar muchos de los procedimientos estadísticos que se aplican habitualmente a estos datos. en este caso, las siguientes variables muestran valores de sesgo estandarizado y de curtosis estandarizada fuera del rango esperado:

<Ninguna>

Las siguientes variables muestran curtosis estandarizada fuera del rango esperado:

<Ninguna>

Nota: No existen variables que se encuentren fuera de Rango, de todos modos debemos verificar con la tabla de resultados de correlación para tomar una decisión si aplicamos un modelo matemático o no sería factible el mismo.

Tabla 5.62 Correlaciones del Análisis Multivariado

| | Valor Soporte California C.B.R. | Resistencia a Compresión Simple | Módulo de Elasticidad |
|---------------------------------|--|--|------------------------------|
| Valor Soporte California C.B.R. | | 0,947 (32) 0,0000 | 0,892 (32) 0,0000 |
| Resistencia a Compresión Simple | 0,947 (32) 0,0000 | | 0,8862 (32) 0,0000 |
| Módulo de Elasticidad | 0,892 (32) 0,0000 | 0,8862 (32) 0,0000 | |

1° Fila: Correlación

2° Fila: (Tamaño de Muestra)

3° Fila: Valor-P

Esta tabla 5.62 muestra las correlaciones momento producto de Pearson, entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables. También se muestra, entre paréntesis, el número de pares de datos utilizados para calcular cada coeficiente. El tercer número en cada bloque de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0,05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0%. Los siguientes pares de variables tienen valores-P por debajo de 0,05:

Valor Soporte California C.B.R. y Resistencia a Compresión Simple

Valor Soporte California C.B.R. y Modulo de Elasticidad

Resistencia a Compresión Simple y Modulo de Elasticidad

Esta tabla nos indica una buena correlación entre las variables: Valor Soporte California CBR, Resistencia a Compresión Simple y Modulo de Elasticidad. Entonces

podemos generar mediante una regresión múltiple un modelo matemático que ajuste estos datos sin problema y con una confiabilidad aceptable.

5.5.2. Regresión Múltiple no Lineal para las tres variables a través del Software Estadístico

Aplicando el método estadístico de la Regresión Múltiple Lineal para las tres variables mencionadas anteriormente, mediante el software estadístico se obtienen los siguientes resultados:

Número de variables dependientes: 1 en función de Valor Soporte California C.B.R.

Número de factores categóricos: 0

Número de factores cuantitativos: 2

A=Módulo de Elasticidad (Variable Dependiente)

B=Resistencia a Compresión Simple (Variable Dependiente)

Tabla 5.63 Análisis de Varianza para Valor Soporte California C.B.R.

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Modelo | 85987,8 | 2 | 42993,9 | 146,11 | 0,0000 |
| Residuo | 8533,17 | 29 | 294,247 | | |
| Total (Corr.) | 94521,0 | 31 | | | |

Tabla 5.64 Suma de Cuadrados Tipo III

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|---------------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Módulo de Elasticidad | 1224,74 | 1 | 1224,74 | 4,16 | 0,0505 |
| Resistencia a Compresión Simple | 10787,8 | 1 | 10787,8 | 36,66 | 0,0000 |
| Residuo | 8533,17 | 29 | 294,247 | | |
| Total (corregido) | 94521,0 | 31 | | | |

R-Cuadrada = 90,9722 %

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 90,3496 %

Error estándar del est. = 17,1536

Error medio absoluto = 13,3279

Estadístico Durbin-Watson = 1,33284 (P=0,0182)

Esta ventana resume los resultados de ajustar un modelo estadístico lineal general que relaciona a Valor Soporte California C.B.R. con 2 factores predictivos. Dado que el valor-P en la primer tabla ANOVA para Valor Soporte California C.B.R. es menor que 0,05, hay una relación estadísticamente significativa entre Valor Soporte California C.B.R. y las variables predictoras con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 90,9722% de la variabilidad en Valor Soporte California C.B.R. El estadístico R-Cuadrada ajustada, el cual es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 90,3496%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 17,1536. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial.

Tabla 5.65 Límites de confianza del 95,0% para los coeficientes estimados (Valor Soporte California C.B.R.)

| <i>Parámetro</i> | <i>Estimado</i> | <i>Error</i> | | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|------------------------|------------------------|
| | | <i>Estándar</i> | <i>Límite Inferior</i> | <i>Límite Superior</i> |
| CONSTANTE | 48,4337 | 10,6444 | 26,6634 | 70,2039 |
| Módulo de Elasticidad | 0,00132009 | 0,000647048 | -0,00000327599 | 0,00264345 |
| Resistencia a Compresión Simple | 4,48669 | 0,740998 | 2,97118 | 6,0022 |

Podemos observar en los resultados que el modelo matemático tiene una correlación ajustada cuadrada de $R^2 \rightarrow 90,9722\%$ lo que indica que hay una buena correlación entre las variables ajustadas.

Los intervalos de confianza muestran con que precisión se pueden estimar los coeficientes dados la cantidad de datos disponibles y del ruido que está presente. VIF's por encima de 10, de los cuales hay 0, generalmente se considera que indican una seria multicolinealidad. Una seria multicolinealidad aumenta considerablemente la

estimación del error de los coeficientes del modelo, en comparación con una muestra ortogonal.

5.5.3. Obtención de la Gráfica y Ecuación Matemática del Modelo Estadístico

En la siguiente figura se muestran los diagramas de dispersión del modelo matemático.

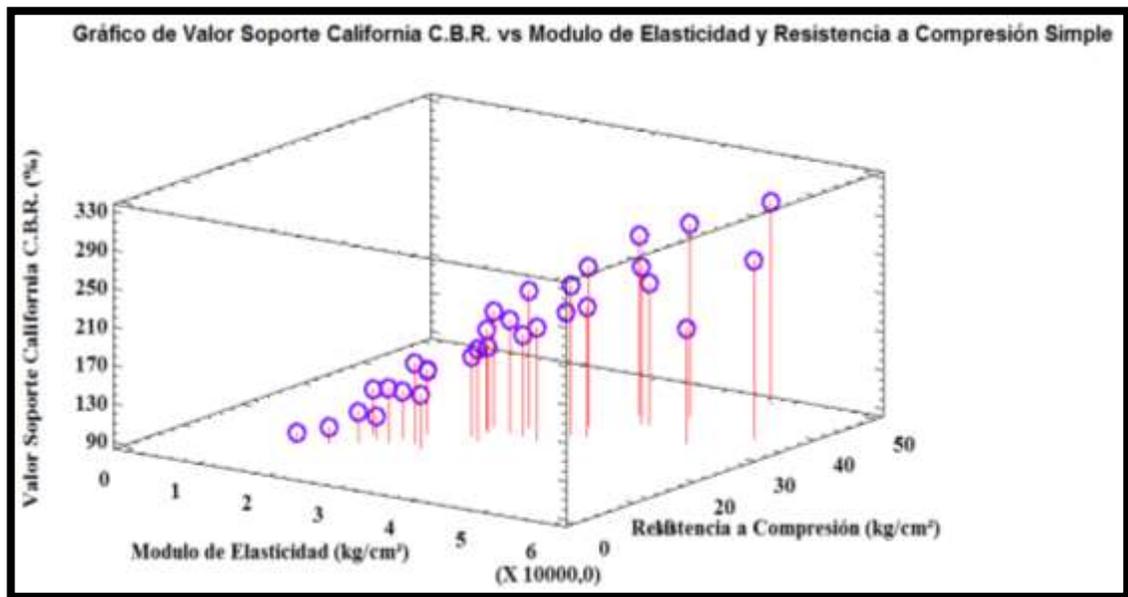


Figura 5.72 Diagrama de Dispersión

El modelo matemático de Regresión Múltiple Lineal es el siguiente:

$$Y = A + B * X_1 + C * X_2$$

Dónde:

Y = CBR Valor Soporte California (%)

X1 = Modulo de Elasticidad Dinámico (kg/cm²)

X2 = Resistencia a Compresión Simple (kg/cm²)

El cual generó la superficie de ajuste que se muestra a continuación:

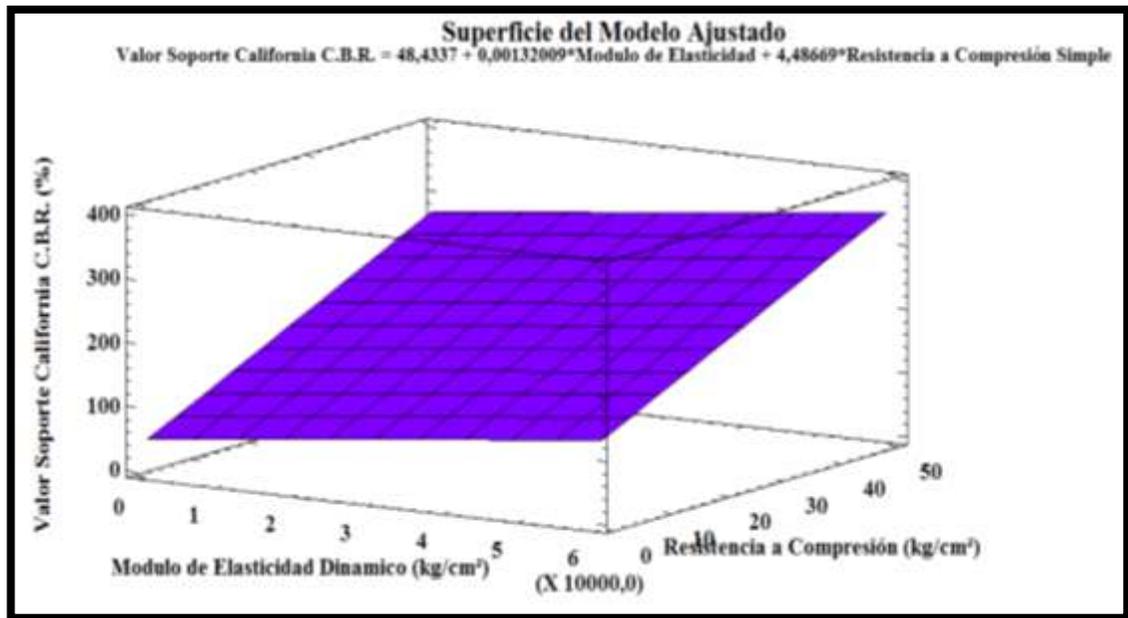


Figura 5.73 Superficie de Ajuste del Modelo Matemático

$$C. B. R. (Val. Sop. Calif.) = 48,4337 + 0,00132009 * Mod. Elast. + 4,48669 * Resist. Comp.$$

El ajuste con el modelo anterior generó un coeficiente de determinación múltiple (R^2) = 0.91 es decir se obtuvo un porcentaje de imprecisión en el ajuste del 9%.

5.5.4. Correlación entre el Módulo de Elasticidad Dinámico y Resistencia a Compresión

El modelo que mejor se ajustó a la regresión fue el de Recíproco Doble:

$$Y = \frac{1}{\left(a + \frac{b}{X}\right)}$$

Dónde:

Y = Módulo de Elasticidad Dinámico (kg/cm²)

X = Resistencia a Compresión Simple (kg/cm²)

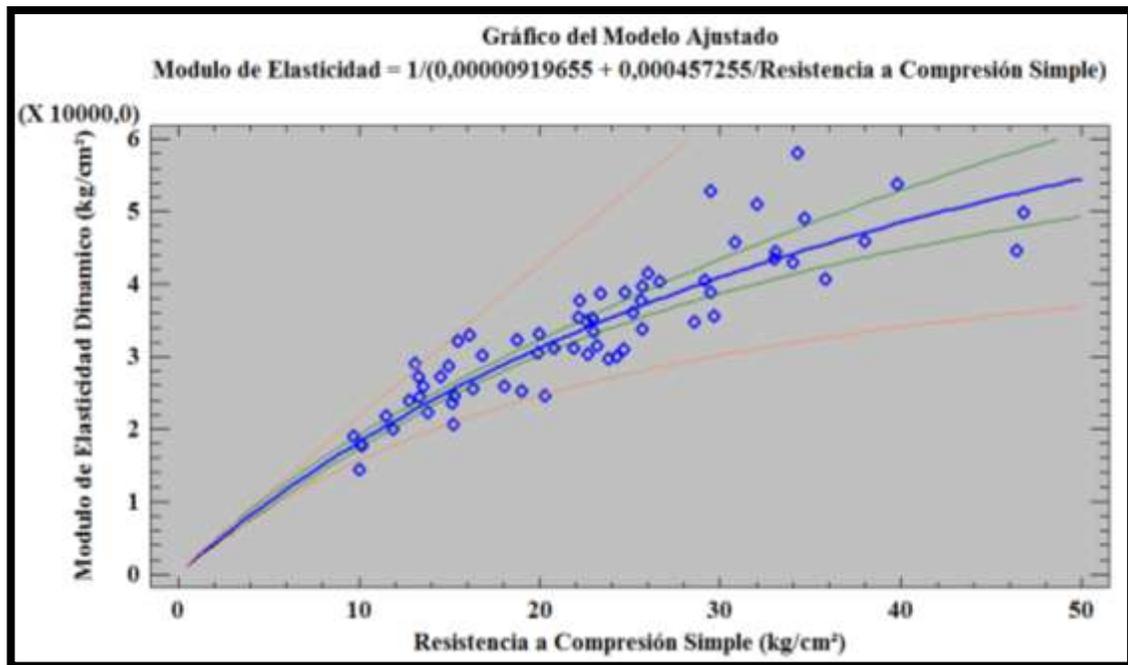


Figura 5.74 Gráfica de Ajuste Módulo de Elasticidad Dinámico vs Resistencia a Compresión

Ecuación:

$$Mod. Elast. Dinámico = \frac{1}{\left(0.00000919655 + \frac{0.000457255}{Resist. Compr. Simple}\right)}$$

$$R^2 = 83.16\% ; C_{correlación} = 0.91$$

El ajuste con el modelo anterior generó un coeficiente de determinación múltiple (R^2) = 0.83 es decir se obtuvo un porcentaje de imprecisión en el ajuste del 17%. El coeficiente de correlación del ajuste es de 0.91 que nos brinda seguridad en la aplicación del modelo ya que hay una buena correlación entre las variables en estudio.

5.5.5. Correlación entre el C.B.R. y la Resistencia a Compresión.

El modelo que mejor se ajustó a la regresión fue el de la Raíz Cuadrada-Y Log-X:

$$Y = (a + b * \ln(X))^2$$

Dónde:

Y = Valor Soporte California C.B.R. (%)

X = Resistencia a Compresión Simple (kg/cm²)

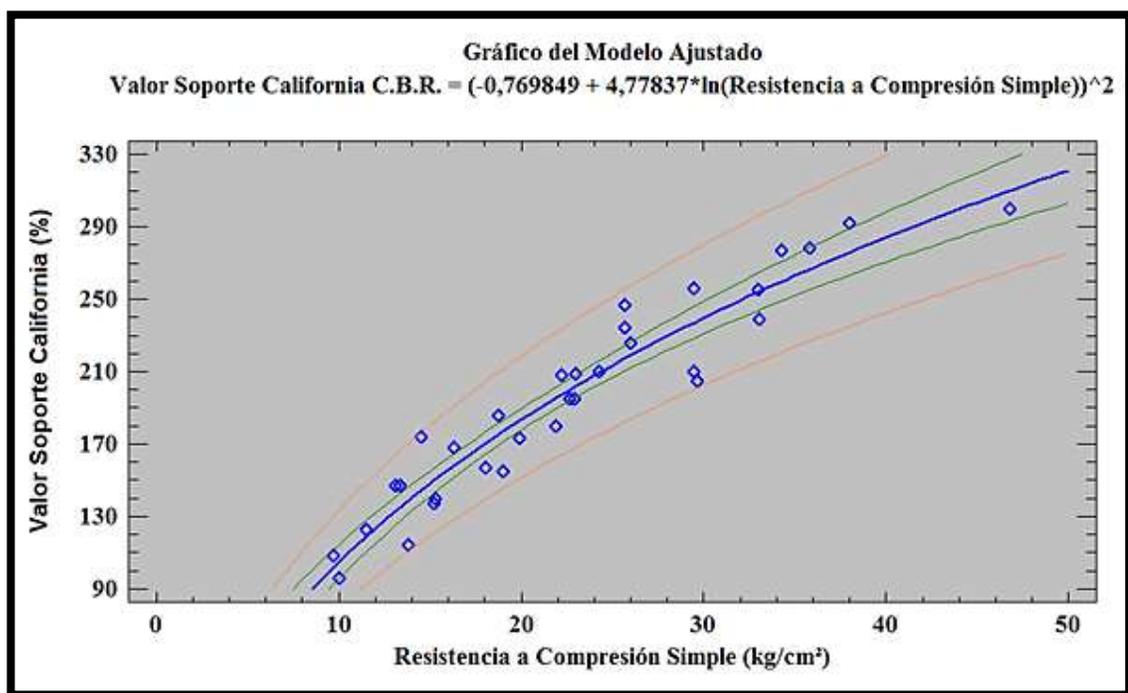


Figura 5.75 Gráfica de Ajuste Módulo de C.B.R. vs Resistencia a Compresión

Ecuación:

$$C.B.R.(\text{Val. Sop. Calif.}) = \left(-0.769849 + 4.77837 * \ln(\text{Resist. Compr. Simple}) \right)^2$$

$$R^2 = 91.44\% ; C_{\text{correlación}} = 0.95$$

El ajuste con el modelo anterior generó un coeficiente de determinación múltiple (R^2) = 0.91 es decir se obtuvo un porcentaje de imprecisión en el ajuste del 9%. El coeficiente de correlación del ajuste es de 0.95 que nos brinda seguridad en la aplicación del modelo ya que hay una buena correlación entre las variables en estudio.

5.5.6. Correlación entre el Modulo de Elasticidad Dinámico y el Valor Soporte California C.B.R.

El modelo que mejor se ajustó a la regresión fue el de Recíproco Doble:

$$Y = \frac{1}{\left(a + \frac{b}{X} \right)}$$

Dónde:

Y = Modulo de Elasticidad Dinámico (kg/cm²)

X = Valor Soporte California C.B.R. (%)

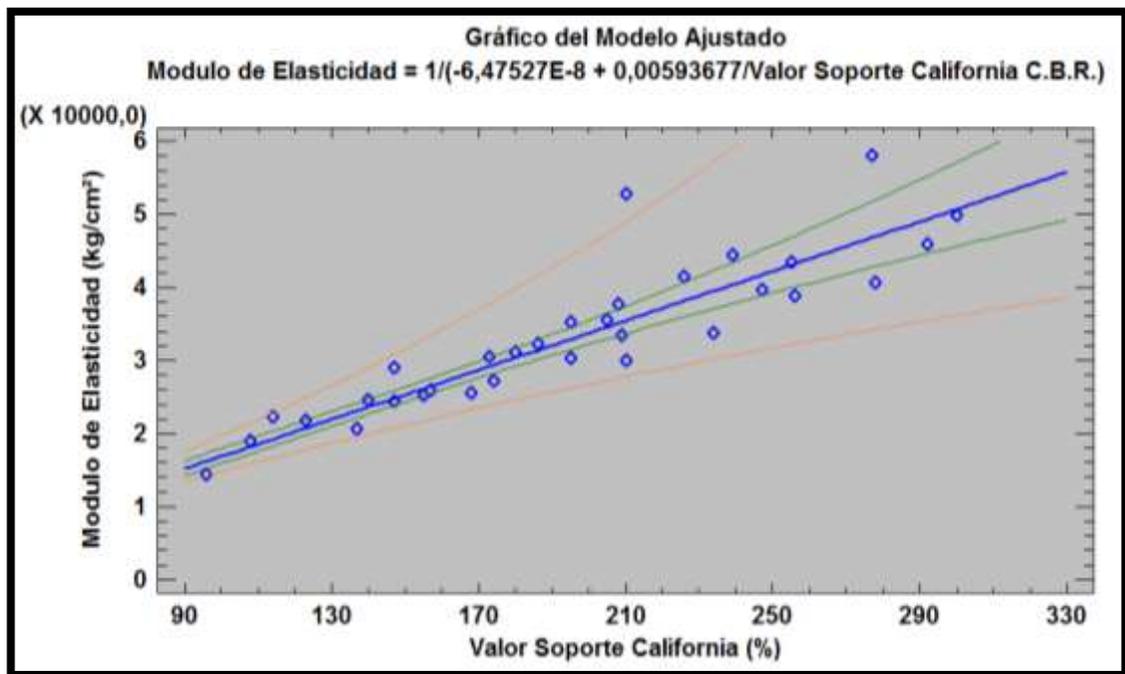


Figura 5.76 Grafica de Ajuste Modulo de Elasticidad Dinámico vs Valor Soporte California C.B.R.

Ecuación:

$$Mod. Elast. Dinámico = \frac{1}{\left(-(6.47527E - 8) + \frac{0.00593677}{C.B.R. (Val Sop. Calif.)} \right)}$$

$$R^2 = 89.11\% ; C_{correlación} = 0.94$$

El ajuste con el modelo anterior generó un coeficiente de determinación múltiple (R^2) = 0.89 es decir se obtuvo un porcentaje de imprecisión en el ajuste del 11%. El coeficiente de correlación del ajuste es de 0.94 que nos brinda seguridad en la aplicación del modelo ya que hay una buena correlación entre las variables en estudio.

5.6. RESUMEN

Los modelos matemáticos que describen el comportamiento y la correlación del Módulo de Elasticidad Dinámico, la Resistencia a Compresión Simple y el Valor Soporte California C.B.R. al relacionarlos con el porcentaje de cemento y a las diferentes edades de prueba se muestran a continuación:

➤ **Módulo de Elasticidad Dinámico:**

$$7093.35+(679.428*\text{Dosif})+(471.421*\text{Edad})+(129.565*\text{Dosif}^2)-(3.75758*\text{Edad}^2)-(9.82155*\text{Dosif}*\text{Edad})+7094.01$$

➤ **Resistencia a Compresión Simple:**

$$4.157+(0.67647*\text{Dosif})+(0.0819574*\text{Edad})+(0.0871354*\text{Dosif}^2)-(0.00101412*\text{Edad}^2)+(0.0145518*\text{Dosif}*\text{Edad})+4.15701$$

➤ **Valor Soporte California C.B.R.:**

$$\text{C.B.R.}=30.4267+(12.1894*\text{Dosif.})+(2.34398*\text{Edad})+(0.0868057*\text{Dosif.}^2)-(0.0214428*\text{Edad}^2)+(0.017863*\text{Dosif.}*\text{Edad})+30.4267$$

Los valores ajustados obtenidos de las anteriores ecuaciones para las tres variables se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 5.66 Módulos de Elasticidad Dinámicos (kg/cm²) Ajustados

| % de Cemento | Edad de Prueba (días) | | | |
|--------------|-----------------------|----------|----------|----------|
| | 3 | 7 | 28 | 60 |
| 3 | 18683,78 | 20301,30 | 26820,56 | 30381,82 |
| 6 | 24131,92 | 25631,59 | 31532,09 | 34150,48 |
| 9 | 31912,24 | 33294,04 | 38575,79 | 40251,31 |
| 12 | 42024,72 | 43288,67 | 47951,66 | 48684,31 |

Tabla 5.67 Valores de Resistencia a Compresión (kg/cm²) Ajustados

| % de Cemento | Edad de Prueba (días) | | | |
|--------------|-----------------------|-------|-------|-------|
| | 3 | 7 | 28 | 60 |
| 3 | 11,50 | 11,96 | 13,85 | 15,01 |
| 6 | 16,01 | 16,64 | 19,45 | 22,01 |
| 9 | 22,09 | 22,90 | 26,63 | 30,58 |
| 12 | 29,74 | 30,73 | 35,37 | 40,72 |

Tabla 5.68 Valores de C.B.R. (%) Ajustados

| % de Cemento | Edad de Prueba (días) | | | |
|--------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| | 3 | 7 | 28 | 60 |
| 3 | 105,20 | 113,94 | 148,52 | 164,86 |
| 6 | 144,28 | 153,22 | 188,94 | 206,99 |
| 9 | 184,91 | 194,07 | 230,91 | 250,68 |
| 12 | 227,11 | 236,48 | 274,45 | 295,93 |

Si se desean conocer valores de módulo de elasticidad dinámico, resistencia a la compresión y/o C.B.R. para edades y/o porcentajes de cemento diferentes a los investigados, se pueden obtener de forma práctica interpolando los valores de las tablas anteriores, aunque si se desea mayor exactitud se deben utilizar las expresiones matemáticas.

Vale la pena aclarar que las regresiones permiten interpolar valores dentro de los rangos de edad y porcentaje de cemento investigados, por lo que no es recomendable realizar extrapolaciones, ya que se podrían obtener resultados erróneos.

Los modelos matemáticos que describe el comportamiento y la correlación entre las características mecánicas (variables dependientes) como ser el Modulo de Elasticidad Dinámico, la Resistencia a Compresión y el Valor Soporte California para el Suelo – Cemento que se estudió en esta investigación, son las siguientes:

- C.B.R. vs Módulo de Elasticidad vs Resistencia a Compresión:

$$C.B.R._{(Val.Sop.Calif.)} = 48.4337 + 0.00132009 * Mod.Elast. + 4.48669 * Resist.Comp.$$

- Módulo de Elasticidad vs Resistencia a Compresión:

$$Mod.Elast.Dinamico = \frac{1}{\left(0.00000919655 + \frac{0.000457255}{Resist.Compr.Simple}\right)}$$

- Valor Soporte California C.B.R. vs Resistencia a Compresión

$$C.B.R._{(Val.Sop.Calif.)} = \left(-0.769849 + 4.77837 * \ln(Resist.Compr.Simple)\right)^2$$

- Módulo de Elasticidad vs Valor Soporte California C.B.R.

$$Mod.Elast.Dinamico = \frac{1}{\left(- (6.47527E - 8) + \frac{0.00593677}{C.B.R._{(Val.Sop.Calif.)}}\right)}$$

A continuación se muestran los gráficos que indica el comportamiento de las variables en magnitud y forma a lo largo del tiempo de estudio:

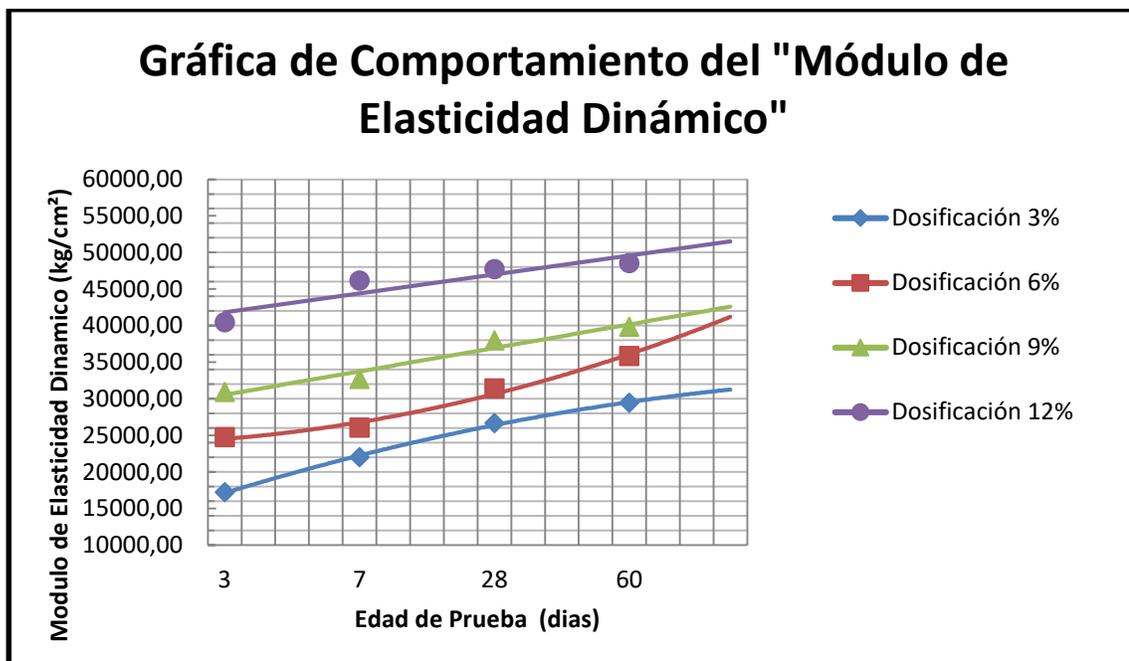


Figura 5.77 Comportamiento del Módulo de Elasticidad Dinámico en el tiempo para diferentes porcentajes de Cemento

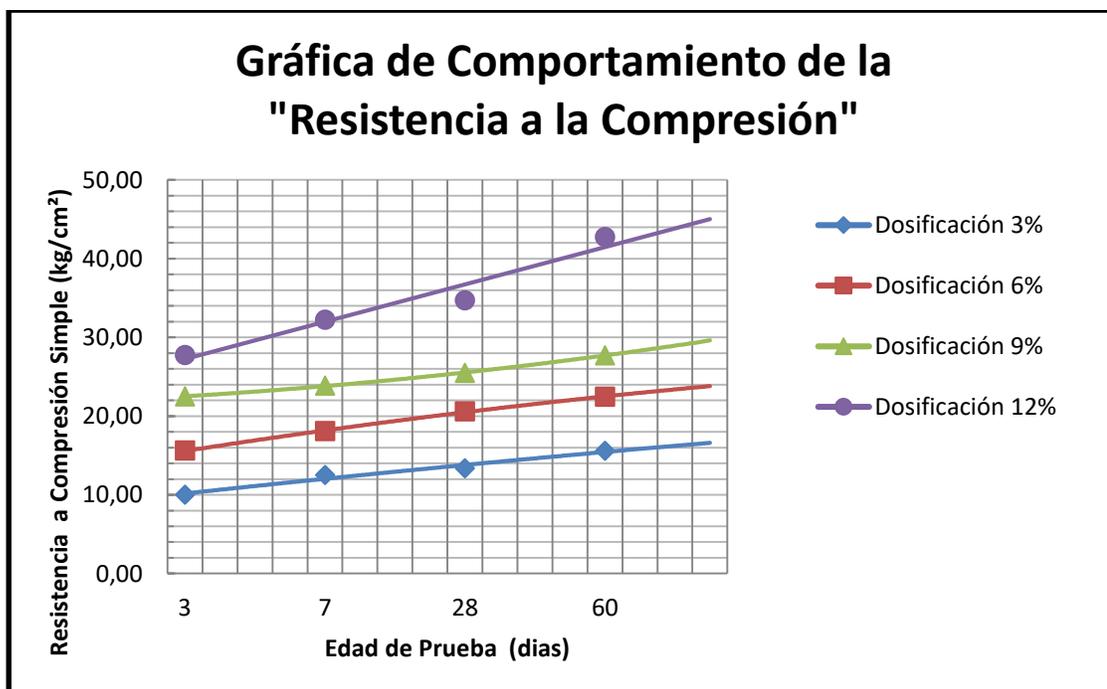


Figura 5.78 Comportamiento de la Resistencia a Compresión en el tiempo para diferentes porcentajes de Cemento

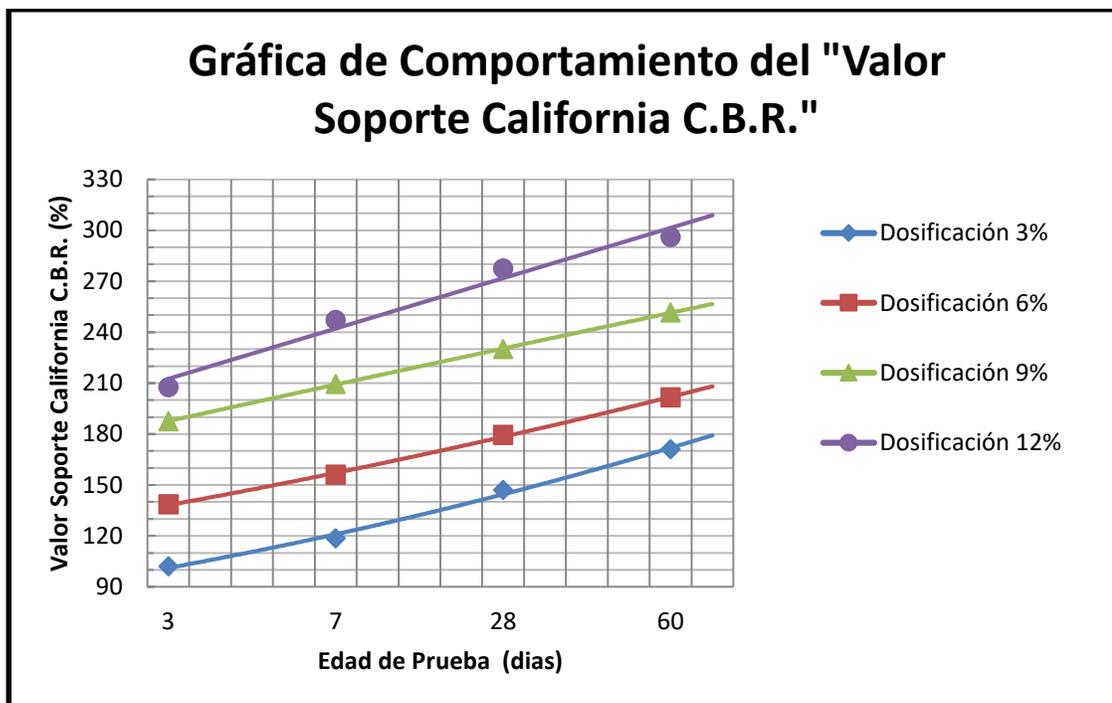


Figura 5.79 Comportamiento del Valor Soporte California C.B.R. en el tiempo para diferentes porcentajes de Cemento

6. CAPÍTULO N°6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- ✓ De acuerdo a la investigación realizada se concluye proponiendo modelos de correlación para las características mecánicas de un Suelo – Cemento (tipo areno arcilloso) como ser el Modulo de Elasticidad Dinámico, la Resistencia a Compresión y el Valor Soporte California C.B.R. en función del porcentaje de Cemento utilizado en la dosificación (3, 6, 9 y 12 %), y la edad de Prueba (3, 7, 28 y 60 días). Así como también entre estas mismas, dichos modelos de correlación se ajustan a una regresión múltiple estadística debido a que se tiene más de dos variables analizadas.

Los valores obtenidos de los coeficientes de correlación (c) y los de determinación múltiple (R²) para estos modelos matemáticos son aceptables en la mayoría arriba del 90 %, por tanto aseguran buenos resultados y confiabilidad en los mismos.

- ✓ Al revisar y estudiar la teoría referente a la temática de la investigación, se pudo identificar los ensayos de laboratorio requeridos para determinar las propiedades mecánicas del Suelo – Cemento como ser el Modulo de Elasticidad Dinámico, la Resistencia a Compresión Simple y el Valor Soporte California C.B.R. dichos ensayos con su respectiva norma de referencia se presentan a continuación:

Granulometría **REFERENCIA ASTM D 422-63**; Límites de Atterberg **REFERENCIA ASTM D 4318-00**; Contenido de Humedad y Clasificación de suelos **REFERENCIA AASTHO Y ASTM**; Grado de finura del cemento **REFERENCIA ASTM C 430**; Peso Específico del Cemento **REFERENCIA NB 064**; Compactación **REFERENCIA PROCTOR AASTHO T - 180 ASTM D 1557**; C.B.R. **REFERENCIA ASTM D 1883**; Módulo de Elasticidad **REFERENCIA ASTM D597-02 (Método de ensayo estándar para velocidad de pulso a través del concreto)**; Resistencia a Compresión **REFERENCIA ASTM D 1633-96**.

- ✓ Los diseños de Suelo – Cemento para los diferentes porcentajes de Cemento se los realizo en función al porcentaje en peso para el Suelo tipo Arena – Arcillosa y el Cemento, para la Dosificación del 3% se calculó el peso del cemento al 3% de la muestra total, ya que para realizar las probetas de prueba se necesita 6000 gr entonces el 3% que corresponde al peso del cemento es 180 gr y 5 820 gr al peso del suelo tipo arena arcillosa. De la misma forma para las diferentes dosificaciones, para el 6% entonces 360 gr de cemento y 5 640 gr de suelo tipo arena arcillosa, para el 9% entonces 540 gr de cemento y 5 460 gr de suelo tipo arena arcillosa, para el 12% entonces 720 gr de cemento y 5 280 gr de suelo tipo arena arcillosa.

Posteriormente teniendo el contenido de humedad del suelo tipo arena arcillosa y la humedad óptima para la densidad máxima de compactación se hace la diferencia de estas dos y el resultado de esa cantidad de agua es lo que se utiliza para la dosificación de cada porcentaje de cemento.

El tipo de suelo a utilizar en una mezcla de suelo cemento puede ser cualquier tipo de suelo especificado según clasificación AASHTO y sistema unificado, excepto los suelos orgánicos o con altos contenidos de sulfatos, sin embargo podemos decir que, el objetivo de especificar los requerimientos granulométricos del suelo es para obtener una mezcla de suelo cemento económica y de buen comportamiento estructural.

- ✓ Para el ensayo del módulo de Elasticidad Dinámico se concluyó que los valores de velocidad obtenidos a través del Equipo Ultrasonido, están directamente relacionados al peso volumétrico de las probetas de prueba, a mayor peso volumétrico mayor es la velocidad de onda por tanto y en función a la ecuación por el equipo de ultrasonido, mayor es el valor del Módulo de Elasticidad. Esta pequeña variación que se da entre los valores del peso volumétrico de cada probeta puede ser debido a que tenemos un suelo No Uniforme y en algunas probetas puede contener un poco más de material fino que en otras probetas. Para el ensayo de la Resistencia a Compresión Simple se evidencio que el valor del esfuerzo va aumentando a medida que aumenta la dosificación y la edad de

prueba de las probetas de prueba y dichos valores están dentro del rango según la teoría entre 7 y 105 kg/cm² en función de la dosificación y la edad de prueba respectivamente.

Para el ensayo del Valor Soporte California se concluyó que los valores de C.B.R.s` obtenidos son altos debido a la gran resistencia de las muestras de suelo – cemento, esto ya nos informaban en la teoría de tablas e investigaciones anteriores echas en otros países, se puede observar el fenómeno de la restitución del suelo – cemento ya que a la hora de someter las muestras a la prensa Tester del C.B.R. al principio hasta la profundidad de deformación de 2 pulg. La carga que se ejercía sobre la muestra crecía considerablemente, hasta llegar a dicha profundidad de deformación donde se fragmentaba la muestra y la carga comenzaba a descender hasta cierta profundidad de penetración donde se restituía el suelo – cemento y volvía a ejercer presión por tanto la carga volvía a subir pero esta vez de forma mucho más lenta y pausada.

También se observó que las muestras de suelo – cemento presentan porcentajes de expansión mínimos ya que la acción del cemento consolida el suelo y sus partículas entre sí, por esto baja considerablemente el índice plástico de cualquier suelo que se mejore con este tratamiento.

- ✓ El módulo de Elasticidad dinámico, la Resistencia a Compresión Simple y el Valor Soporte California C.B.R. son propiedades que dependen tanto de la edad como del porcentaje de cemento en peso contenido en la mezcla, por lo que al realizar pruebas y ensayos de laboratorio es conveniente ajustar los valores obtenidos mediante una regresión múltiple.
- ✓ Los resultados obtenidos son aproximados y válidos para los casos particulares en que los componentes de la mezcla de suelo cemento presenten las condiciones y propiedades de los materiales utilizados en la investigación, por lo tanto las mezclas de suelo cemento deben diseñarse de acuerdo a los requerimientos particulares que se tengan.
- ✓ Se observó que en condiciones de laboratorio, las tres propiedades investigadas varían progresivamente respecto al tiempo, esto es cierto siempre y cuando no

se consideren los efectos de los esfuerzos de fatiga, que son propios de los pavimentos en operación.

- ✓ A partir de la investigación se puede concluir que si se diseña y utiliza adecuadamente, el suelo cemento es una buena opción para la elaboración de bases y subbases de pavimentos.

6.2. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda que si desean conocer valores de módulo de elasticidad dinámico, resistencia a la compresión y/o C.B.R. para edades y/o porcentajes de cemento diferentes a los investigados, se pueden obtener de forma práctica interpolando los valores de las tablas de ajustes de resultados obtenidos a partir de los modelos de correlación, aunque si se desea mayor exactitud se deben utilizar las expresiones matemáticas. Vale la pena aclarar que las regresiones permiten interpolar valores dentro de los rangos de edad y porcentaje de cemento investigados, por lo que no es recomendable realizar extrapolaciones, ya que se podrían obtener resultados erróneos.
- ✓ Se recomienda diseñar las probetas de suelo – cemento con una relación $h/D = 2$ para tener más exactitud en los resultados para la resistencia a compresión, si no se cuentan con moldes de esta dimensión habría que fabricarse los mismos.
- ✓ Se recomienda antes de realizar los diferentes ensayos, calibrar los equipos a utilizar con probetas de prueba para tener mejor precisión en los resultados. Especialmente en el Equipo Ultrasonido.
- ✓ Por los métodos constructivos actuales es recomendable utilizar una energía de compactación de acuerdo a AASHTO T 180 al momento de realizar los especímenes de suelo cemento a ensayar. Esto para proporcionar la energía de compactación congruente con la energía de compactación que se esté utilizando en el proyecto.
- ✓ Con el fin de tener un conocimiento general del comportamiento de las bases estabilizadas con cemento, mediante la adición de distintos porcentajes de

cemento al aplicado en esta tesis, se recomienda realizar un estudio para los diferentes casos.

- ✓ Se debe hacer un seguimiento del comportamiento de los pavimentos en los que se ha realizado la estabilización de las bases con cemento, con el fin de ver si se incrementa su durabilidad.