

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL



**CORRELACIÓN DEL MODULO DE ELASTICIDAD  
DINAMICO, RESISTENCIA A LA COMPRESION Y  
COEFICIENTE DE CAPA EN BASES DE SUELO  
CEMENTO.**

PRESENTADO POR:

**LUIS ERNESTO GUERRERO URQUILLA  
HÉCTOR ARMANDO MIRANDA MARTÍNEZ  
JOSÉ ANTONIO RAMÍREZ**

PARA OPTAR AL TITULO DE:  
**INGENIERO CIVIL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO DE 2008

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :  
**MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ**

SECRETARIO GENERAL :  
**LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO :  
**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

SECRETARIO :  
**ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ**

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

DIRECTOR :  
**MSc. ING. FREDY FABRICIO ORELLANA CALDERÓN**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:  
**INGENIERO CIVIL**

Título :

**CORRELACIÓN DEL MODULO DE ELASTICIDAD  
DINAMICO, RESISTENCIA A LA COMPRESION Y  
COEFICIENTE DE CAPA EN BASES DE SUELO  
CEMENTO.**

Presentado por :

**LUIS ERNESTO GUERRERO URQUILLA  
HÉCTOR ARMANDO MIRANDA MARTÍNEZ  
JOSÉ ANTONIO RAMÍREZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por :

Docentes Directores :

**ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA  
ING. DILBER SÁNCHEZ VIDES  
ING. CARLOS ANTONIO QUINTANILLA RODRÍGUEZ**

SAN SALVADOR, JULIO DE 2008

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

**ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA**

**ING. DILBER SÁNCHEZ VIDES**

**ING. CARLOS ANTONIO QUINTANILLA RODRÍGUEZ**

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR:**

Por habernos formado y dado la oportunidad de crecer intelectualmente y a la vez forjarnos como personas de bien.

### **A NUESTROS ASESORES:**

#### **Ing. Mauricio Ernesto Valencia**

Por su orientación, atención y aporte en el desarrollo de este trabajo, así como también por los ánimos e inquietudes generadas en cada una de las etapas de la investigación.

#### **Ing. Dilber Antonio Sánchez Vides**

Por el tiempo, ánimos, conocimientos e información brindados en este trabajo, así como también por el gran apoyo durante la realización de las investigaciones de laboratorio.

#### **Ing. Carlos Antonio Quintanilla**

Por todos los conocimientos que nos brindó, la información que puso a nuestro alcance, por guiarnos y orientarnos en esta investigación, por el tiempo que puso a nuestra disposición y los ánimos que nos generó.

### **Al laboratorio de la Universidad de El Salvador**

Queremos agradecer a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron desinteresadamente durante la realización de este trabajo de graduación:

Tec. Carlos Edgardo Morataya.

Prof. Ramón Evelio López.

#### **Ing. Edgar Gavidia.**

Por su apoyo y amistad durante la realización de esta investigación.

### **Al Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto (ISCYC)**

Por apoyar el desarrollo de esta investigación y desinteresadamente facilitar sus instalaciones para el desarrollo de todos los ensayos de laboratorio, así mismo agradecer al siguiente personal:

Ing. Ricardo Burgos  
Tec. Adiel Rodríguez  
Tec. Julio Hernández  
Tec. Edilmar Avalos  
Tec. Víctor Ramírez.

Y a todas las personas que de una u otra manera colaboraron dando sus conocimientos y opiniones para enriquecer esta investigación.

**Luis, Armando y Antonio.**

## **DEDICATORIA**

**A DIOS:** *Por darme fortaleza en los momentos de flaqueza, y bendiciones en los momentos más difíciles, por colocar a mi lado personas sinceras, prestarme la vida y por permitirme realizar mis metas.*

**A MIS PADRES:** *Francisco Adalberto Guerrero (Q.D.D.G.), por guiarme y orientarme en el estudio de esta carrera, por todo el apoyo que recibí de él y por todos los consejos que siempre fueron y serán una guía en mi vida, a María del Carmen Urquilla, porque sin su apoyo, dedicación y atención nunca hubiera podido alcanzar esta meta, porque siempre estuvo en los momentos más difíciles para apoyarme y darme sus sabios consejos e inculcarme valores que guiaran mi vida.*

**A MIS HERMANOS:** *Walter, Mauricio que siempre me han comprendido y apoyado para que pueda llegar a alcanzar esta meta.*

**A MIS PRIMOS Y PRIMAS:** *Por estar dispuestos y dispuestas a ayudarme siempre que lo necesité y por brindarme ese especial cariño y apoyo que es de gran importancia en la consecución de esta meta.*

**A MIS TÍAS Y TÍO:** *Gracias les doy por estar a la expectativa de mis estudios sus sabios consejos y su permanente apoyo han permitido que pueda llegar a alcanzar este triunfo.*

**A COMPAÑEROS DE TESIS:** *Armando y Antonio porque pusieron todo su esfuerzo y dedicación para que pudiéramos desarrollar esta investigación, y porque a lo largo de nuestra carrera hemos sido muy buenos amigos*

**A MIS AMIGOS:** *que son muchos y no los podría nombrar a todos, pero con especial aprecio a Francisco Javier Fuentes y David Armando Fuentes, por su incondicional apoyo y su amistad sincera que la han demostrado en los momentos más difíciles de la vida.*

*Luis Ernesto Guerrero Urquilla.*

## **AGRADECIMIENTOS**

**A Dios por darme apoyo y fortaleza en todo momento y por darme la oportunidad de finalizar este trabajo de graduación.**

**A mis padres Armando Miranda Quezada y Estela Martínez de Miranda por todo su apoyo, cariño y comprensión en todas las etapas de mi vida.**

**A mis hermanos Marla, Melvin, Kelvin y a mi prima Eunice; todos parte fundamental de mi vida.**

**A mi novia Susana Minero por todo su cariño y apoyo incondicional.**

**A mi familia y amigos.**

*Hay hombres que luchan un día y son buenos.*

*Hay otros que luchan un año y son mejores.*

*Hay quienes luchan muchos años y son muy buenos.*

*Pero hay los que luchan toda la vida: esos son los imprescindibles.*

***Bertolt Brecht***

Héctor Armando Miranda Martínez

## DEDICATORIA

Al Dios de Jesús de Nazaret,  
a mi familia, hermanos, hermanas, amigos y amigas.

Antonio Ramírez.

## **INDICE.**

### **CAPITULO I: ANTEPROYECTO.**

1.1	Introducción.	1
1.2	Antecedentes.	3
1.3	Planteamiento del Problema.	5
1.4	Objetivos.	6
1.5	Alcances.	7
1.6	Limitaciones.	7
1.7	Justificación.	8

### **CAPITULO II: SUELO CEMENTO.**

2.1	Generalidades del suelo cemento.	10
2.1.1	Definiciones.	10
2.1.2	Aplicaciones del suelo cemento.	14
2.1.3	Ventajas del uso del suelo cemento.	15
2.1.4	Desventajas del uso del suelo cemento.	21
2.2	Componentes del suelo cemento.	22
2.2.1	Suelo.	22
2.2.2	Cemento.	31
2.2.3	Agua.	37
2.2.4	Aditivos.	39
2.3	Propiedades.	41
2.3.1	Propiedades Físicas del suelo cemento.	41
2.3.2	Propiedades Mecánicas del suelo cemento.	45

2.4	Diseño de Mezclas de suelo cemento.	59
2.4.1	Criterios ACI 230.	59
2.4.2	Método según PCA.	67
	• Método detallado de la PCA.	67
	• Método corto de la PCA.	68
	• Método rápido de la PCA.	78
2.5	Diseño Estructural de Bases y Subbases de suelo cemento.	78
2.5.1	Metodología AASHTO.	79
2.5.2	Método según PCA.	91
2.6	Proceso constructivo de Bases y Subbases de suelo cemento.	95
2.6.1	Actividades Previas.	95
2.6.2	Preparación del terreno.	97
2.6.3	Elaboración de la mezcla de suelo cemento.	97
2.6.4	Conformación y compactación.	108
2.6.5	Control de contracciones.	114
2.6.6	Curado.	115
2.6.7	Control de calidad.	116

### **CAPITULO III: DISEÑO DE PRUEBA.**

3.1	Materiales a utilizar en la elaboración de mezclas de prueba.	132
3.1.1	Clasificación de suelo para propósitos de ingeniería.	133
	• Análisis granulométrico.	133
	• Límites de Atterberg.	140
3.1.2	Características del Cemento a utilizar.	144
	• Cemento ASTM C-1157 tipo HE.	144
	• Cemento ASTM C-91 tipo M.	145
3.1.3	Agua.	146

3.2	Compactación de acuerdo a norma AASHTO T-180.	146
3.3	Elaboración de especímenes de prueba.	147
3.3.1	Realización de ensayo próctor al suelo a utilizar.	148
3.3.2	Realización de ensayo próctor para determinar humedades óptimas en las mezclas de suelo cemento para los diferentes proporcionamientos.	152
3.3.3	Elaboración de especímenes de prueba para los diferentes proporcionamientos de suelo cemento a investigar.	153
3.4	Curado de especímenes.	160
3.5	Ensayo para la determinación del Módulo de Elasticidad Dinámico.	162
3.5.1	Resultados obtenidos utilizando cemento ASTM C-91 tipo M.	173
3.5.2	Resultados obtenidos utilizando cemento ASTM C-1157 tipo HE.	178
3.6	Ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión.	183
3.6.1	Resultados obtenidos utilizando cemento ASTM C-91 tipo M.	188
3.6.2	Resultados obtenidos utilizando cemento ASTM C-1157 tipo HE.	193
3.7	Determinación del coeficiente estructural de capa.	198

## **CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

4.1	Análisis estadístico.	206
4.2	Ajuste de datos obtenidos de módulo de elasticidad dinámico.	210

4.2.1	Resultados utilizando mezclas con cemento ASTM C-91 Tipo M.	210
4.2.2	Resultados utilizando mezclas con cemento ASTM C-1157 Tipo HE.	213
4.3	Ajuste de datos obtenidos de Resistencia a la compresión.	215
4.3.1	Resultados utilizando mezclas con cemento ASTM C-91 Tipo M.	215
4.3.2	Resultados utilizando mezclas con cemento ASTM C-1157 Tipo HE.	217
4.4	Correlación.	219
4.4.1	Correlación entre el modulo de elasticidad y Resistencia a la Compresión.	219
4.4.2	Coefficiente de capa.	220
4.4.3	Correlación entre el modulo de elasticidad y coeficiente de capa.	223
4.5	Resumen.	224

## **CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

5.1	Conclusiones.	232
5.2	Recomendaciones.	235

	<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	237
--	----------------------	-----

	<b>ANEXOS.</b>	239
--	----------------	-----

# **1. CAPITULO I**

## **1.1.Introducción.**

El uso de cemento para estabilizar suelos ha sido considerado en el área de la ingeniería como una contribución significativa, ya que tiene múltiples aplicaciones en el campo de la construcción especialmente para la estabilización de cimentaciones en edificaciones de pequeña y gran magnitud, en terracerías, bases para pisos, bases y subbases para carreteras; requiriendo para su adecuado desempeño, material selecto y relativamente pequeñas cantidades de cemento, generando así un nuevo material compuesto, comúnmente conocido como “Suelo cemento”; el cual presenta una gran versatilidad ya que permite ampliar de manera considerable la utilización de casi todos los suelos como materiales de construcción.

Uno de los usos más generalizados del suelo cemento se ha dado en la construcción de vías terrestres, ya que es utilizado en la conformación de bases y subbases de las estructuras de pavimentos por las múltiples ventajas que presenta sobre las prácticas tradicionales, en las que se utilizan materiales granulares.

Para garantizar la buena calidad de las capas estabilizadas con suelo cemento es necesario que estas sean durables, para lograr dicha durabilidad es indispensable que estas tengan elevada capacidad de soporte y resista a los agentes atmosféricos, por lo que la etapa de diseño es esencial para este fin.

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 del suelo-cemento como lo son la resistencia a la compresión, el modulo de

elasticidad dinámico y el coeficiente de capa, para proporcionamiento de cemento en peso entre el 2% y 8%, determinando además correlaciones entre estas variables.

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 para bases y subbases de pavimentos.

## **1.2. Antecedentes.**

El progreso de una región depende en gran medida de sus vías de comunicación, ya que propician el buen funcionamiento de los bienes y servicios dirigidos a la población y el desarrollo de la economía y de otros aspectos tales como la política, la cultura, el campo social entre otros. De aquí la importancia de mantener en buen estado las vías de comunicación.

Desde tiempos ancestrales, 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 su 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. Ejemplo de ello, son trabajos realizados en la India y en las pirámides de Shaanxi en China construidas hace 5000 años, las vías de comunicación durante el Imperio Romano y los famosos caminos blancos “sacbéh” de los Mayas, construidos hace 2,500 años en la zona norte de Mesoamérica. Así mismo, en otras civilizaciones como el Imperio Inca y azteca.

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 registro 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.

Después de 1945, terminada la segunda guerra mundial, se inician en España y Latinoamérica, practicas con suelo cemento aplicado a carreteras, siendo Argentina, Colombia y El Salvador los países con más de 50 años de experiencia en la construcción de caminos de este tipo. Al mismo tiempo, en algunos países de Europa como Alemania y Francia, así como también en Australia se logró un continuo crecimiento en el uso del suelo cemento especialmente después de 1950.

Desde entonces el uso del suelo cemento en El Salvador ha sido progresivo, ya que en la actualidad el 95% de los caminos rurales pavimentados tienen base de suelo cemento, y en los últimos 10 años, la mayoría de las nuevas vías urbanas e interurbanas y pisos industriales se han construido utilizando bases de suelo cemento con excelentes resultados.

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.

### **1.3. Planteamiento del Problema.**

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, su uso ha disminuido, teniendo que buscar otras alternativas.

Es por ello que en la actualidad se está utilizando el cemento como un componente estabilizador de suelos, tomando en cuenta también una serie de ventajas que esta práctica proporciona. El uso de suelo cemento en nuestro país tiene más de 50 años, tiempo durante el cual se han realizado ciertas investigaciones, las cuales han sido de gran utilidad, pero aun es necesario ampliar el estudio de algunas propiedades con el fin de generar un registro de datos más amplio lo cual nos permitiría optimizar el uso de este material, ya que en la actualidad la carencia de registros propios nos obliga a utilizar datos y correlaciones foráneas las cuales pueden no ser aplicables a nuestro medio.

Teniendo registros propios de estas propiedades, tales como el módulo de elasticidad dinámico, la resistencia a la compresión y el coeficiente de capa, se pueden establecer correlaciones propias, lo cual, nos permitirá obtener diseños estructurales de pavimentos más acordes a la realidad, y utilizar racionalmente las dosificaciones de suelo cemento y tipos de cemento que más convengan y se adapten al tipo de proyecto.

## **1.4.Objetivos.**

### **1.4.1. Objetivo General.**

Profundizar en el estudio del suelo cemento aplicado a bases y subbases de pavimento, con el fin de optimizar los materiales en el diseño de mezclas, el diseño la estructura de pavimentos, su construcción y su control de calidad, a través de la realización de diferentes diseños de mezcla que nos permitan cuantificar, analizar y correlacionar las propiedades mecánicas de este material.

### **1.4.2. Objetivos Específicos.**

- ◆ Realizar diseños de mezclas de suelo cemento para los contenidos de cemento en peso del 2%, 4%, 6%, y 8%. Utilizando arena limosa y cemento según norma ASTM C-1157 tipo HE y ASTM C-91 tipo M.
- ◆ Realizar ensayos de resistencia a compresión y módulo de elasticidad dinámico a diferentes edades de prueba. Para los diferentes proporcionamientos y tipos de cemento propuestos.
- ◆ Obtener las correlaciones entre el modulo de elasticidad dinámico, la resistencia a la compresión y el coeficiente de capa de las muestras ensayadas.

## **1.5. Alcances.**

La investigación se enfocará en el estudio de las propiedades del suelo-cemento, como material utilizado en bases para pavimentos. Específicamente en la determinación del modulo de elasticidad dinámico, la resistencia a la compresión y el coeficiente de capa, a edades de pruebas de 3, 7, 28, 60, 90 y 120 días, utilizando cemento ASTM C-1157 tipo HE y ASTM C-91 tipo M, con porcentajes de cemento en peso de 2%, 4%, 6% y 8%, el material a utilizar en la mezcla es una arena limosa, la cual es uno de los materiales predominantes en el área de San Salvador y en otros lugares de nuestro país. Se establecerán relaciones y correlaciones entre estas propiedades. La energía de compactación que se utilizara para la realización de probetas, obtención de densidades máximas y humedades óptimas será según la norma AASHTO T-180.

## **1.6. Limitaciones.**

Debido a la variedad de cementos existentes, se hace demasiado extenso el realizar el trabajo 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 los cementos ASTM C-1157 tipo HE y ASTM C-91 tipo M; y suelo areno-limoso.

Debido a que el equipo para determinar el coeficiente estructural de capa no esta disponible en el país, no se determinara directamente por medio de ensayos, se obtendrá a por medio de correlaciones con otras propiedades.

La investigación esta 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 un mayor auge, 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 mas 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. CAPITULO II: SUELO CEMENTO.**

### **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.

#### **2.1.1. 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<sup>1</sup>, 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<sup>2</sup>, a 7 días debe ser mayor de 2.5 MPa), y su modulo de elasticidad presenta valores del orden de 6,000 MPa con suelos granulares y superiores a 10,000 MPa si se emplean zahorras.

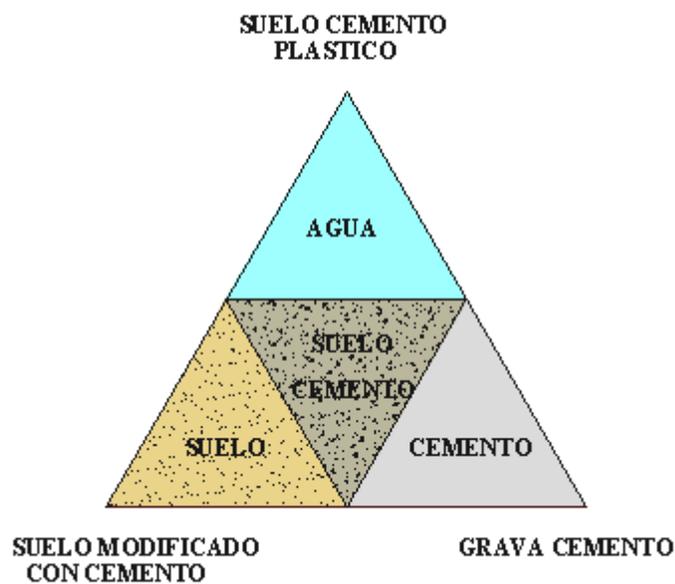
---

<sup>1</sup> Se define como zahorra el material granular, de granulometría continua utilizado como capa de pavimento.

<sup>2</sup> Pliego de Prescripciones Técnicas Generales Para Carreteras y Puentes, de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento. España.

Se usa normalmente como capa de apoyo (Subbase) de otros materiales tratados con cemento, o bien como capa resistente (base inferior) bajo capas bituminosas, se fabrica normalmente en planta central, aunque se puede ejecutar in situ mediante equipos similares a los empleados en la estabilización de explanadas o subrasantes, o en el reciclado de pavimentos con cemento.

De acuerdo a la revista Argos publicada por las cementeras colombianas, En la pirámide de la Fig. 2.1 se observa en cada una de sus aristas uno de los componentes del suelo cemento. Cuando ponemos a cada uno de ellos a predominar en la mezcla, obtendremos materiales resultantes con características y propiedades distintas.



**Fig. 2.1 Mezclas de suelo cemento según material predominante.**

Los cuatro materiales que podemos derivar de estas combinaciones son: el suelo-cemento plástico, el suelo modificado con cemento, la grava cemento y el suelo-cemento propiamente dicho.

- **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. /cm<sup>2</sup> a 28 días. Consiste en una mezcla de suelo fino, cemento y agua suficiente para dar una consistencia fluida. En nuestro país es popularmente conocido como lodocreto. 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./m<sup>3</sup>, obteniéndose resistencias de hasta 70 Kg./cm<sup>2</sup>. 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 sollicitaciones 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, es una mezcla 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.*

### **2.1.2. 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.

Es bastante atractivo su uso en la reparación de pavimentos fallados, por su fácil aplicación, ya que permite aprovechar íntegramente el material usado para hacer una nueva base. La reutilización del material colocado es económica y rápida de hacer, obteniéndose después de tratada una base dura y rígida. En general para estas reparaciones no se requieren grandes cantidades de cemento. Los pavimentos flexibles viejos pueden re-usarse escarificándolos y pulverizándolos para aplicarles el cemento y el agua para su posterior compactación.

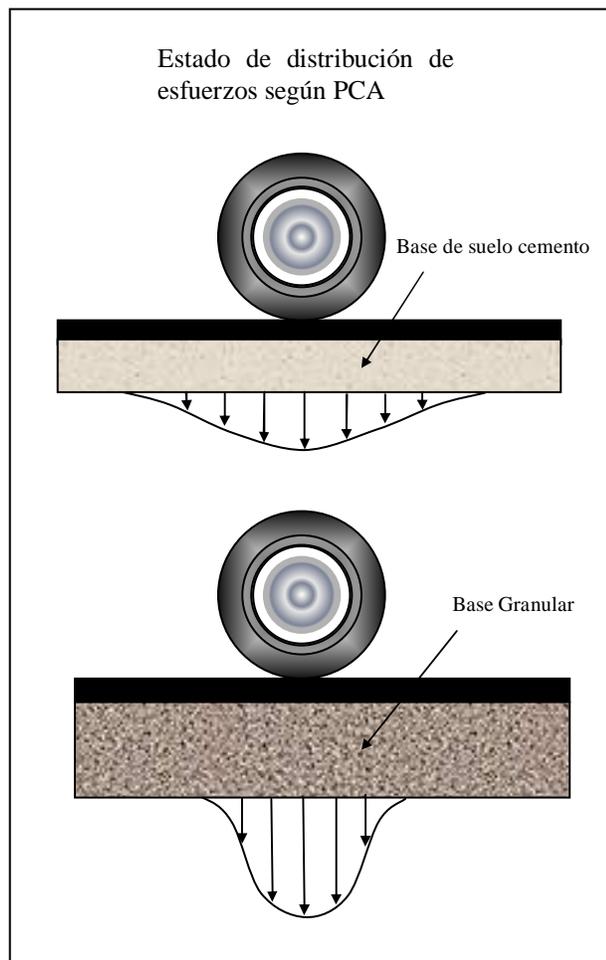
### **2.1.3. Ventajas del uso del suelo cemento.**

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. 2.2)



**Fig. 2.2 distribución de presiones en las capas de pavimento**

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.

Ha sido notable su prolongada durabilidad bajo condiciones adversas. Se le ha probado en forma exhaustiva en climas extremos, por lo que se ha usado frecuentemente para pavimentos en lugares con condiciones climáticas muy desfavorables de América, Europa y Asia.

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.

Desde el concepto mismo de su funcionamiento el suelo-cemento presenta un comportamiento a la fatiga bastante bueno, permitiendo aún en condiciones extremas, cumplir su función de mantener su estructura interna en excelentes condiciones.

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. (fig. 2.3)

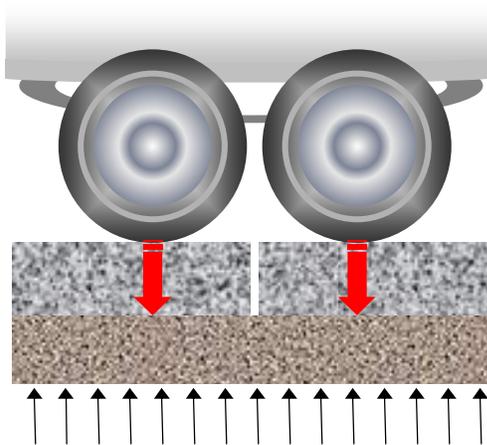


Fig. 2.3 distribución uniforme de presiones

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.

Muchas veces la capa de soporte llamada subrasante esta determinada por un número llamado CBR (California Bearing Ratio), en la actualidad se utiliza el Modulo de reacción k, y Modulo de resiliencia (Mr.), cuando ésta debería ser evaluada como otra capa del pavimento. Si además de esta abstracción, permitimos que a ella lleguen, en forma casi que directa las cargas del transito, tendremos múltiples problemas asociados a la capacidad de soporte que el suelo nos puede brindar. Si, por el contrario, nos aseguramos que las cargas sean distribuidas de una forma más eficiente, de tal manera que involucren áreas mayores, podemos concluir que las presiones sobre la subrasante serán mucho más tolerables y los problemas asociados desaparecerán completamente.

#### **2.1.4. 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.
- La liga entre diferentes capas es dificultosa.
- 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.

## **2.2. Componentes del suelo Cemento.**

### **2.2.1. 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<sup>3</sup> 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%.

Los suelos con bastante contenido de arcillas tienen serios inconvenientes ya que producen mucho agrietamiento final y los tratamientos previos de humedecimiento o de secado comúnmente necesarios para su compactación son costosos y difíciles. Además, durante la construcción el proceso de mezclado es sumamente laborioso. La AASHTO da las recomendaciones que se presentan en la Tabla 2.1 y en la Tabla 2.2. Por su parte, la ASTM da una serie de recomendaciones que se recopilan en la Tabla 2.3.

---

<sup>3</sup> SUELO CEMENTO-Usos, propiedades y aplicaciones

<b>Tabla 2.1 Graduaciones recomendables para tratamientos de suelos arenos-arcillosos</b>			
<b>MATERIAL</b>	<b>CONDICIONES DE LLUVIA EN LA ZONA</b>		
	<b>Fuerte 1</b>	<b>Moderada 2</b>	<b>Escasa 3</b>
<b>PORCIONES DE ARENA:</b>			
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
<b>PORCIONES DE LIMO:</b>			
Finos de 0.05 a 0.005 mm	3-20	0-15	10-20
<b>PORCIONES DE ARCILLA:</b>			
Finos menores de 0.005 mm	7-20	9-18	15-25

Fuente: AASTHO

<b>Tabla 2.2 Clasificación de la AASTHO preparada para el diseño de suelo-cemento.</b>							
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b>	<b>GRUPOS DE SUELOS GRANULARES ( 35 % ó menos pasa la malla # 200 )</b>						
	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	35 max
<b>CARACTERÍSTICAS DE LA FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA No. 200</b>							
Límite líquido			40 max	41 min.	40 max	41 min.	
índice de plasticidad	6 max		N.P.	10 max	10 max	11 min.	11 min.
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b>	<b>GRUPOS DE SUELOS LIMO-ARCILLOSOS (Más del 35 % se retienen en la malla # 200).</b>						
	% 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.			
<b>CARACTERÍSTICAS DE LA FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA No. 200:</b>							
Límite líquido	40max	41 min.	40 max	41 min.			
índice de plasticidad	10max	10 max	11 min.	11 min.			

Fuente: AASTHO M 145

<b>Tabla 2.3 Especificaciones para los agregados de las bases o las subbases.</b>		
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
<b>REQUERIMIENTOS ADICIONALES:</b>		
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%		

**Fuente: Norma ASTM D2940.**

Es importante tener en cuenta que existen diversos criterios en varios países, que limitan y especifican las características que debe tener un suelo para considerarse aceptable en la elaboración de una mezcla de suelo cemento, si se comparan dichos criterios entre si, existen diferencias respecto a ciertos requerimientos, sin embargo, todos coinciden en limitar aspectos relativos con la granulometría del suelo, proceso constructivo y cumplimiento de requerimientos del diseño de mezcla y de la estructura del pavimento. Una comparación de requisitos granulométricos exigidos por algunas entidades se presenta en las Tablas 2.4 y 2.5.

**Tabla 2.4 REQUISITOS GRANULOMETRICOS  
COMPARACION CON NORMATIVAS INTERNACIONALES**

El Salvador (SIECA)	Colombia INVIAS (2002)	Canada Saskatchewan Highways and transportation 1998	Estados Unidos PCA (2003)	Organización de las Naciones Unidas ONU	ACI 230	España
Pasa N°4 50 - 100%	Pasa N° 4 ≥ 40%			Pasa N° 4 ≈ 75 % Pasa N° 4 ≈ 25 %	Pasa N° 4 ≥ 55%	*
Pasa N°200 5- 35%	Pasa N°200 < 50%	Pasa N° 200 5-30%		Pasa N° 200 < 10 %	Pasa N° 200 5-35%	
Tmax 50 mm (2")	Tmax 75mm (3")	Tmax 63mm (2 1/2")	Tmax 50mm (2")		Tmax 50mm	*

\* Los valores dependen del tipo de Suelo Cemento y Tráfico estipulado en Catálogos de Secciones. Los requisitos granulométricos se encuentran en el Pliego de Prescripciones Técnicas para Obras de Carreteras y Puentes. FOM/891/04.

Fuente: Revista ISCYC No. 43.

**Tabla 2.5 REQUISITOS DE PLASTICIDAD  
COMPARACION CON NORMATIVAS INTERNACIONALES**

El Salvador (SIECA)	Colombia INVIAS (2002)	Canada Saskatchewan Highways and transportation (1998)	Instituto Mexicano del Transporte IMT	Experiencias en Sudáfrica	España
LL < 40% *	LL < 35%		LL 45-50%		LL < 30%
IP < 8% *	IP < 15%	IP < 10%	IP < 25%	IP < 8%	IP < 15%

\* Se cuenta con experiencia de buenos resultados, en casos donde el suelo presentó LL < 55% y IP < 25%.

Fuente: Revista ISCYC No. 43.

### **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 por que 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<sup>4</sup> 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 mas 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.

---

<sup>4</sup> SUELO CEMENTO-Usos, propiedades y aplicaciones

Es importante aclarar que estos grupos no pretenden ser una clasificación como tal, si no, simplemente pretenden describir de forma general la composición del suelo adecuada para la elaboración de suelo-cemento, para un análisis más apropiado se debe hacer una clasificación para uso de ingeniería.

**i. Existencia de cantidades apreciables de sales que atacan al cemento.**

En las regiones desérticas o semidesérticas en las que la evaporación del agua provoca grandes concentraciones de sales en la superficie de los suelos pueden existir cantidades apreciables de sulfatos (sodio, potasio, calcio y magnesio) que ataquen al cemento y destruyan finalmente al material tratado.

**j. Existencia de cantidades apreciables de materia orgánica**

La materia orgánica se encuentra casi siempre en la superficie de los suelos en profundidades variables. En un banco, si existen cantidades apreciables, pueden hacer inservible al suelo para su tratamiento con cemento. En general, se considera que el 2 % de materia orgánica es un límite superior que no conviene pasar; a menos que se realicen las pruebas de laboratorio pertinentes que determinen el comportamiento con cantidades mayores.

El tipo de materia orgánica es difícil de probar en el laboratorio; en cambio determinar su cantidad es muy simple. Lo último se logra comúnmente, ya sea quemando juntos la materia orgánica y suelo en un horno, para después pesar lo que queda y deducir la cantidad de materia orgánica volatilizada (ASTM 2974, AASHTO T-194).

En las investigaciones realizadas por Clare K. E. y Sherwood, se determinó que la materia orgánica y el exceso de sal, especialmente de sulfatos de calcio o

magnesio, pueden retardar o evitar la hidratación del cemento. También se encontró que los compuestos orgánicos con peso molecular alto, tales como celulosa, almidón, lignina, no afectan la resistencia; por otra parte, la materia orgánica que tiene peso molecular bajo, tales como los ácidos nucleicos y la dextrosa, actúan como retardadores de la hidratación del cemento y provocan bajas resistencias.

*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.*

*Es importante recalcar que los requerimientos que reiteradamente coinciden en los diversos criterios utilizados en diferentes países, son referentes a la granulometría del suelo, el proceso constructivo y cumplimiento de exigencias estructurales y de diseño de mezclas.*

### 2.2.2. Cemento.

#### Generalidades del cemento.

Fue descubierto en 1756 por JOHN SMEATON, inglés, el primero de los ingenieros civiles contemporáneos. Cuando se encarga de la reconstrucción del faro de Eddystone, comenzó a estudiar algunas calizas arcillosas que parecían producir el mejor concreto hidráulico.

Sin embargo la patente británica para la fabricación de un material llamado cemento Pórtland, un pariente lejano del cemento que hoy conocemos, le fue otorgada a JOSEPH ASPDIN en 1824, quien ha generado una polémica acerca de la importancia de su trabajo en el desarrollo de este material.

STEINOUR efectuó una investigación posterior, encontrando que la clave por la cual el cemento ha llegado a la evolución de nuestros días fueron las temperaturas usadas en el proceso de fabricación. Algunos investigadores contemporáneos como I.C. JOHNSON y WILLIAM ASPDIN, utilizando los mismos materiales que JOSEPH ASPDIN, concluyeron que éste llevó el material a temperaturas por encima de su punto de fusión, combinando así casi toda la cal (CaO) libre, produciendo un material superior.

**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	-----
▪ <b>Cemento Pozolánico</b>	<b>ASTM C 1157</b>
▪ Cemento Aluminoso	-----
▪ <b>Cemento de Mampostería</b>	<b>ASTM C 91</b>
▪ Cemento Blanco	ASTM C 150

**En nuestro país los cementos Pórtland que se fabrican en la actualidad son los siguientes:**

- **Cemento Pórtland sin adiciones (ASTM C 150)**

Son cementos que se obtienen por molienda conjunta de clinker y de la cantidad adecuada de regulador de fraguado.

Los cementos Pórtland que se especifican en la norma ASTM C 150 son de cinco diferentes tipos, estos son:

- TIPO I Cemento de uso general, cuando no se necesitan las propiedades especiales de otros cementos.

- TIPO II Cemento de uso general que tiene resistencia moderada a los sulfatos y calor de hidratación inferior al cemento Tipo I.
- TIPO III Cemento de alta resistencia a temprana edad.
- TIPO IV Cemento indicado cuando se necesita calor de hidratación bajo.
- TIPO V Cemento utilizable cuando se requiere resistencia a los sulfatos.

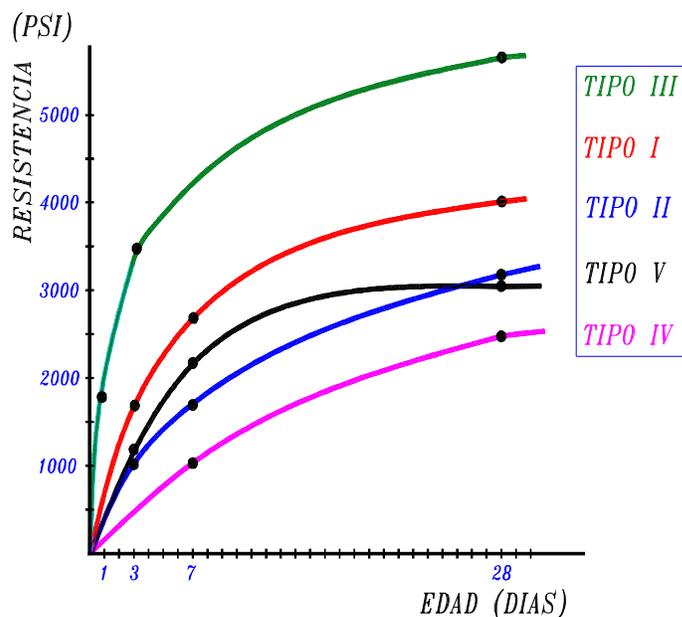


Fig. 2.4 Comportamiento de la resistencia a la compresión del cemento tipo ASTM C 150.

- **Cemento Puzolánico (ASTM C 1157)**

Son los cementos que se obtienen por la molienda conjunta de clinker de cemento Pórtland y regulador del fraguado, en proporción inferior al 80% en peso y puzolana en proporción superior al 20% en peso.

Los tipos de cementos mezclados cubiertos por la especificación ASTM C 1157 están definidos para las aplicaciones indicadas de la siguiente manera:

- TIPO GU: Cemento hidráulico mezclado para construcciones generales. Se usa cuando uno o más de los tipos especiales no son requeridos.
- TIPO HE: Alta resistencia temprana, muy utilizado para pavimentos y estabilización de suelos.
- TIPO MS: Moderada resistencia a los sulfatos (no se fabrica localmente).
- TIPO HS: Alta resistencia a los sulfatos (no se fabrica localmente).
- TIPO MH: Moderado calor de hidratación (no se fabrica localmente).
- TIPO LH: Bajo calor de hidratación (no se fabrica localmente).

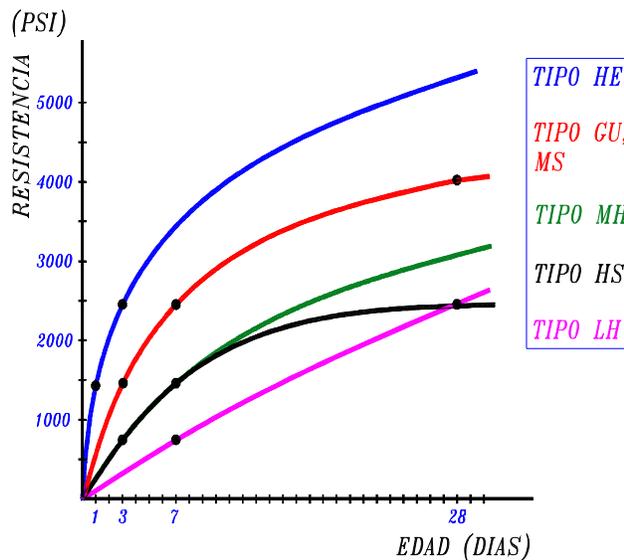


Fig. 2.5 comportamiento de la resistencia a la compresión del cemento tipo ASTM C 1157.

- **Cemento de Mampostería (ASTM C 91)**

Son los cementos que se obtienen por la molienda de Clinker de cemento Portland y regulador del fraguado con o sin adiciones hidráulicamente activas en proporción igual o superior al 60% en peso; y materiales plastificantes, tales como caliza o cal hidratada y otros materiales que mejoren una o más propiedades tales como la trabajabilidad, la retención de agua y el contenido de aire del mortero.

Los tipos de cementos mezclados cubiertos por la especificación ASTM C 91 están definidos para las aplicaciones indicadas de la siguiente manera:

- TIPO N Para el uso en la preparación del mortero del tipo N de la especificación ASTM C 270.
- TIPO S Para el uso en la preparación del mortero del tipo S de la especificación ASTM C 270 sin la adición posterior de cementos o de la cal hidratada.
- TIPO M Para el uso en la preparación del mortero del tipo M de la especificación ASTM C 270 sin la adición posterior de cementos o de la cal hidratada.
- **Cemento Blanco (ASTM C 150)**  
Son cementos que, perteneciendo a los tipos de Portland o compuestos, presentan como propiedad adicional la de la blancura que determinada por la medida de su reflectancia luminosa direccional, no será menor del 70% del valor que corresponde al Oxido Magnesico en polvo calidad reactivo para análisis. Su característica principal radica en la ausencia de Oxido Férrico y otros minerales minoritarios con poder colorante.

### **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, Sin embargo La PCA y FP sugieren que cementos Mezclados bajo la norma ASTM C595 o cementos por desempeño tipo HE ó GU según ASTM C1157 pueden ser utilizados en la elaboración de suelo cemento. Muchos autores son de la opinión, que la tendencia al

agrietamiento en general, aumenta con el contenido de cemento y con la utilización de suelos finos y plásticos, disminuyendo la resistencia del conjunto, por tanto, sugieren estabilizar dichos suelos con uso de la cal.

En El Salvador se han utilizado cementos bajo la norma ASTM C150 tipo I, ASTM C595 tipo IP (no se fabrica actualmente en el país) y ASTM C1157 tipo HE y GU para elaborar mezclas de suelo cemento, en los últimos seis años, se han realizado diversas investigaciones en laboratorio y campo, así como ejecución de proyectos utilizando cemento ASTM C91 tipo M, para elaborar mezclas de suelo cemento con casi todos los tipos de suelo, incluyendo suelos muy finos y de alta plasticidad, aunque de acuerdo a criterios de algunas instituciones no es recomendable el uso de estos tipos de suelo, los resultados han sido sorprendentes en lo referente al control de la contracción y generación de fisuras, así como en el incremento de las propiedades mecánicas del material.

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.

En cuanto al contenido de cemento a considerar para estabilizar un suelo, el ACI 230.1R recomienda en la tabla 2.6 porcentajes de cemento en función del tipo de suelo, los cuales no deben considerarse como diseños de mezcla, sino como una estimación inicial del contenido de cemento en un procedimiento de proporcionamiento y diseño de mezclas. La Tabla 2.6 muestra contenidos iniciales de cementos exigidos por varias entidades.

**Tabla 2.6 CONTENIDO INICIAL DE CEMENTO DE ACUERDO A LA METODOLOGIA Y CLASIFICACION 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-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	--		

**Tabla 2.6 contenidos iniciales de cementos exigidos por varias entidades.**

*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.*

### **2.2.3. 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<sup>5</sup>.

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

---

<sup>5</sup> IMCYC, Suelo-Cemento Usos, Propiedades y Aplicaciones

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<sup>6</sup>.

#### **2.2.4. Aditivos.**

Aditivos químicos, escasamente han sido utilizado en mezclas de suelo cemento, existen mas 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.

En el caso de las adiciones, estas han sido utilizadas en mayor cantidad que los aditivos químicos, adiciones como por ejemplo, puzolanas y cenizas volantes según ASTM C618.

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.

---

<sup>6</sup> ACI 230R.1

De acuerdo con el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) los aditivos más usados son:

- Aditivos higroscópicos: Azúcar, clorhido de sodio, clorado de calcio.
- Aditivos para reducir el contenido de agua durante el mezclado: Ligno-sulfatos (Pozzolith 8).
- Agentes floculantes: Cal.
- Agentes reductores del calor de hidratación de la mezcla: Fly-Ash y carbonatos de sodio.
- Agentes endurecedores y selladores de superficie: Sales de sodio, silicatos de sodio, hidróxidos de sodio, silicatos de sodio.
- Aditivos expansivos: Sulfatos de sódio, Sales, Aluminados.
- Cementos expansivos: Cemento Pórtland tipo V.
- Agentes para favorecer la liga entre capas de suelo-cemento: Lignosulfato de calcio y ácido carboxílico hidroxilatado.

La efectividad de cada aditivo es función del tipo de suelo y de las condiciones ambientales. Generalmente, existe una cantidad óptima de aditivo que producirá el mejor resultado.

Los aditivos que han mostrado ser más beneficiosos para reducir el agrietamiento son, en orden de importancia:

- Cenizas volantes (Fly-ash),
- Pozzolith,
- Clorhido de calcio,
- Sulfatos de magnesio, sodio y calcio,
- Cementos expansivos,
- Hidróxidos de sodio (solamente en caolinitas).

Según Arman y Dantin la utilización de lignosulfato de calcio y de ácido carboxílico hidroxilatado han sido efectivos para mejorar la liga entre las capas. En suma, con la inclusión de aditivos se pueden obtener bastantes ventajas y en algunos casos desventajas.

### **2.3.Propiedades.**

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.

Se puede hacer una clasificación de las propiedades físicas y mecánicas del suelo-cemento:

#### **2.3.1. Propiedades Físicas del suelo cemento**

##### **a. Densidad**

La densidad del suelo cemento es usualmente medida en términos del peso volumétrico seco máximo, el cual es utilizado como uno de los parámetros de control de campo. La relación humedad optima – densidad máxima, puede variar para un mismo tipo de suelo y contenido de cemento si se cambia la energía de compactación, esto

significa que un incremento en el peso volumétrico seco máximo provocado por una mayor energía de compactación que no llegue a fracturar las partículas de suelo, incrementará notablemente la resistencia a compresión del suelo cemento y mejorará el resto de propiedades estructurales.

Tradicionalmente, los diseños de mezcla de suelo cemento se han realizado en función de la energía de compactación según ASTM D558 o AASHTO T134. Sin embargo, en los últimos 10 años, diversos países han adoptado en sus métodos de diseño de mezclas y especificaciones una mayor energía de compactación aplicando la norma AASHTO T180, este cambio ha resultado ser muy congruente y compatible con la energía de compactación generada por los equipos de hoy en día. Así mismo, el costo de las mezclas se ha logrado optimizar, ya que diseños de mezcla han requerido una menor cantidad de cemento para lograr la resistencia especificada, esto debido al incremento en la energía de compactación.

Finalmente, un suelo granular no plástico con un peso volumétrico seco máximo relativamente alto, será una excelente opción cuando se trate de cumplir parámetros estructurales muy exigentes.

### **b. Permeabilidad**

En general, la permeabilidad de la mayoría de suelos, es reducida con la adición de cemento Pórtland, la permeabilidad, dependerá principalmente del tipo de suelo, contenido de cemento y de una compactación adecuada.

Cuando se diseñan mezclas de suelo cemento con fines de impermeabilización, como el caso de estanques u otro tipo de obra rústica para almacenamiento permanente o temporal de agua, es muy importante evitar en lo posible, contracciones que generen fisuras generalizadas en la superficie del suelo cemento, para ello, se deberá seleccionar

adecuadamente el tipo y contenido de cemento, con fines precisamente de lograr una menor contracción y mayor impermeabilidad, más que la obtención de un parámetro de resistencia mecánica.

Las mezclas de suelo cemento elaboradas con suelos finos son las que presentan y mantienen con el tiempo una menor permeabilidad, valores típicos de coeficiente de permeabilidad K, en mezclas de suelo cemento elaboradas con suelos areno – limosos, varían de 0.4 a  $3 \times 10^{-6}$  cm./seg. el porcentaje de cemento en estos casos corresponde a valores inferiores al 5% en peso.

### **c. Contracción**

La contracción en las mezclas de suelo cemento es el resultado de la pérdida de agua por secado y de las reacciones ocurridas durante la hidratación del cemento. Los factores que influyen en el nivel de severidad y grado de agrietamiento son numerosos y complejos, entre ellos están: el tipo y cantidad de cemento utilizado, el contenido y calidad agua aplicado en el campo, las propiedades de los agregados, los procedimientos de curado realizados, condiciones de clima, tiempo de colocación y grado de restricción en la interfase capa subyacente – base de suelo cemento.

Las causas y soluciones al agrietamiento por contracción en mezclas de suelo cemento, ha sido estudiado por mas de 50 años, las referencias que han ayudado mucho a comprender este fenómeno, son los estudios desarrollados por George K.P.<sup>7</sup> en 1972, Williams<sup>8</sup> R.I.T. en 1986, y Estudios mas recientes desarrollados en Australia por Caltabiano<sup>9</sup>, M.A. and Rawlings R.E. quienes proponen un limite en la contracción lineal, un máximo de partículas que pasan la malla N° 200 y el uso de cementos mezclados.

---

<sup>7</sup> Mechanisms of Shrinkage Cracking in Soil Cement Bases. Highway Research Record.

<sup>8</sup> Cement Treated Bases, Elsevier Publishers Ltd, 1986.

<sup>9</sup> Treatment of Reflection cracks in Queens Land. 1992

En la actualidad países como Francia, España y E.U.A. han desarrollado y puesto en práctica sistemas para minimizar el agrietamiento por contracción, dichos sistemas se fundamentan en la implementación de técnicas constructivas innovadoras como la prefisuración y creación de juntas en fresco y procedimientos de compactación posterior y Microagrietamiento.

En El Salvador se ha logrado minimizar el fisuramiento controlando satisfactoriamente la contracción sin la realización de juntas, esto se ha logrado a través de mejoras a los requerimientos de diseño de mezclas, y especialmente en el tipo de cemento a utilizar y energía de compactación aplicada<sup>10</sup>.

#### **d. Agrietamiento.**

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

El agrietamiento es una característica del suelo-cemento. Se puede observar en casi todas las construcciones de suelo-cemento la formación de grietas por contracción, relativamente poco espaciadas. Estas grietas finas se forman de tal manera que permiten una buena traba o entrelazamiento del material, lo que es suficiente en pavimentos para que se comporte en forma similar a una base de piedra triturada. Algunos autores consideran a las capas de suelo-cemento como una serie de trozos grandes que están juntos, a los que llaman "islas".

---

<sup>10</sup> El estado del arte del suelo cemento en estructuras de pavimento. Revista ISCYC Año 11, Numero 43.

### **e. Resistencia a La Congelación.**

El suelo-cemento alcanza una excelente resistencia a la congelación. La resistencia a la congelación dependerá de la cantidad y tipo del cemento usado, así como del tipo de suelo.

Por alcanzar buenas características de resistencia a la congelación se le utiliza mucho en países de clima frío extremo, en nuestro país, esta propiedad no es determinante debido a las características climáticas existentes.

## **2.3.2. Propiedades Mecánicas del suelo cemento**

### **a. Resistencia a La Compresión Simple.**

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.

<b>Tipo de Suelo. SUCS</b>	<b>F'c a 7 días (psi)</b>	<b>F'c a 28 días (psi)</b>
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

**Tabla 2.7 Resistencia a compresión simple de 7 y 28 días**

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.

<b>Capa de suelo estabilizado</b>	<b>Resistencia mínima de compresión, psi*</b>		
	<b>Pavimento flexible</b>		<b>Pavimento rígido, todas las agencias</b>
	<b>Ejercito y Fuerza Aérea (EUA)</b>	<b>Marina (EUA)</b>	
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 volantes<sup>11</sup>

**Tabla 2.8 Resistencia mínima a compresión simple para suelos estabilizados con cemento, cal y cal-cemento y cenizas volantes.**

<sup>11</sup> Fuente: Minimum unconfined compressive strengths for cement, lime, and combined lime-cement-fly ash stabilized soils.

Requerimientos Mínimos Para La Evaluación De La Resistencia A La Compresión Simple Exigidas En Varios Países<sup>12</sup>. Se muestran en las siguientes tablas (Curado Húmedo).

#### EL SALVADOR

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

**Tabla 2.9**

#### 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

**Tabla 2.10 INVIAS (COLOMBIA)**

<b>Bases estabilizadas: Resistencia a 7 días = 21 kg/cm<sup>2</sup> (300 psi)</b>
-----------------------------------------------------------------------------------

**Tabla 2.11**

#### ESPAÑA

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

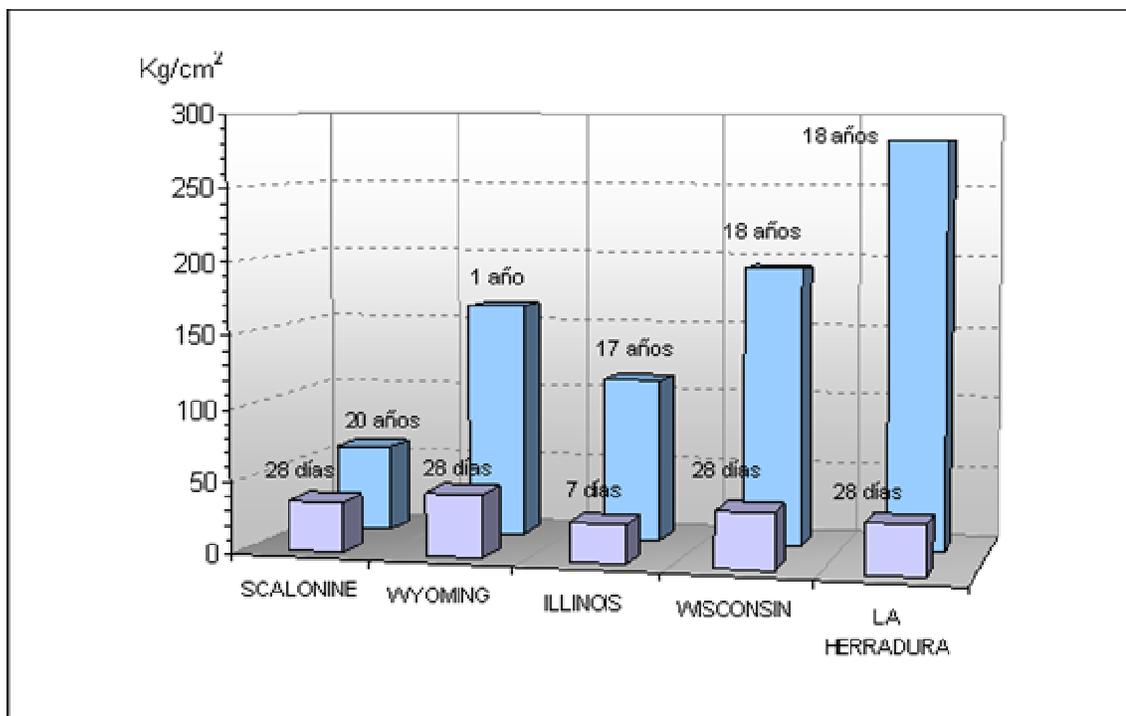
**Tabla 2.12**

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. Uno de los trabajo de investigación desarrollados en El

<sup>12</sup> Los valores de resistencia, son obtenidos según procedimiento de elaboración de especímenes, energía de compactación aplicada, forma y tamaño del espécimen estipulado en normas de cada país.

Salvador en una carretera de mas de 50 años de estar en servicio, demostró la evolución de prácticamente todos los parámetros de resistencia mecánica que pueden evaluarse en mezclas de suelo cemento. Para el caso de los valores de resistencia a compresión simple promedio obtenidos en dicho estudio, se presenta en la Fig. 2.7, comparativo con otros proyectos desarrollados y evaluados a largo plazo en los Estados Unidos de América.

Resistencia a la compresión simple ( $\text{Kg/cm}^2$ )



**Fig. 2.7 Estudio comparativo de resistencia a compresión simple de especímenes de suelo cemento a través del tiempo para diferentes proyectos. (Revista ISCYC No. 43)**

## **b. 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 modulo 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 modulo de ruptura:

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

Donde:

MR = Modulo de ruptura en psi.

F'c = Resistencia a la compresión simple en psi.

Diversos autores coinciden que el modulo 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<sup>13</sup> el modulo 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 modulo de ruptura a 28 días es de 6 a 17 Kg./cm<sup>2</sup>.

---

<sup>13</sup> Netherlands Stichting Studie C. Holanda

### **c. Modulo de elasticidad.**

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 modulo de elasticidad estáticos en mezclas de suelo cemento elaboradas con suelos granulares varían de 40,000 Kg./cm<sup>2</sup> a 71,000 Kg./cm<sup>2</sup>, En las figuras de la 2.8 (a y b) a la 2.10 se muestra la obtención de módulos de elasticidad estáticos y dinámicos en laboratorio.

La PCA y AASHTO sugieren valores entre 35,000 Kg./cm<sup>2</sup> y 148,000 Kg./cm<sup>2</sup> a 28 días para la mayoría de mezclas.

Diversos proyectos de investigación se han realizado en El Salvador referente a la determinación de módulos de elasticidad estáticos y dinámicos en mezclas de suelo cemento. En general, mezclas elaboradas con el 4 al 5% de cemento en peso en suelos granulares no plásticos, presentan valores de módulos de elasticidad estáticos entre 38,000 y 60,000 kg/cm<sup>2</sup>

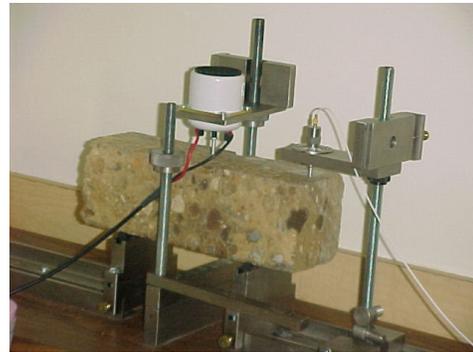
a 28 días. En el caso de suelos finos y plásticos han presentado valores límite de 34,000 kg/cm<sup>2</sup>.

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 practica común cuando se realizan cálculos de diseño estructural de pavimentos.

Esta práctica genera la posibilidad que el valor seleccionado no sea representativo para el suelo, tipo y contenido de cemento a utilizar en el proyecto.



(a)



(b)

**Fig. 2.8 (a) y (b) Frecuencia Resonante para la determinación de módulos de elasticidad en muestras inalteradas de Suelo Cemento**



**Fig. 2.9**

**Determinación de módulos de elasticidad  
módulos estáticos**



**Fig. 2.10**

**Pulso ultrasónico para la determinación de  
módulos dinámicos**

#### **d. 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.

**e. Capacidad de soporte del suelo cemento.**

**Valor de Soporte de California (C.B.R)**

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

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.

<b>Tabla 2.13. Propiedades comúnmente exigidas a las mezclas de suelo-cemento</b>				
TIPO DE CAPA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE A 7 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	C.B.R. %	EXPANSION <sup>(1)</sup> %	PERDIDAS DE PESO EN P. HUMED.YSEC. <sup>(2)</sup> %
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.

### **Modulo De Reacción (K).**

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 (Fig. 2.11) aunque puede ser determinado por otros métodos como el deflectómetro de impacto o FWD (Falling Weight Deflectometer) o por correlaciones con el CBR.



**Fig. 2.11** Equipo utilizado en la realización de prueba de placa de carga

#### **f. 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 sollicitaciones, cuya amplitud final es menor que la resistencia a la ruptura obtenida con una única sollicitación 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. 2.12), de donde obtienen las fórmulas aproximadas:

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

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

Donde:

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

S<sub>0</sub>: deformación para una carga.

N: repeticiones de carga.

F: esfuerzo de ruptura a N repeticiones.

F<sub>0</sub>: esfuerzo de ruptura para una carga.

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

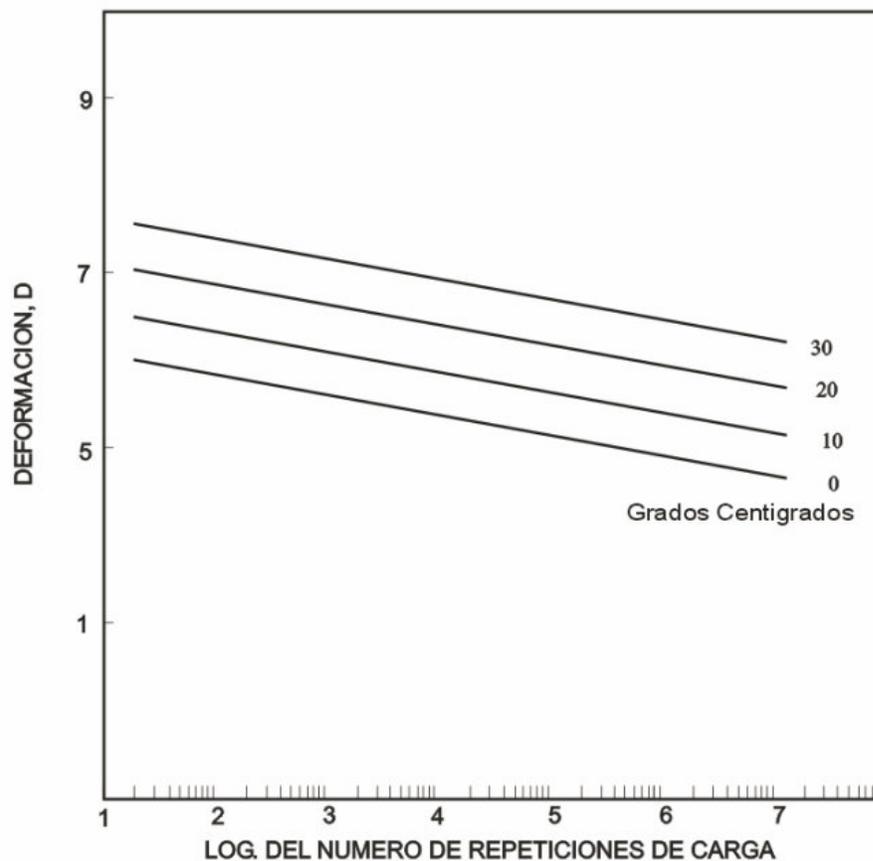


Fig. 2.12 pruebas típicas de fatiga sobre suelo-cemento diagrama de Wholer.

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.

**g. Modulo De Poisson.**

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

<b>Tabla 2.14 Módulos de Poisson medios del suelo-cemento.</b>	
<b>INVESTIGADORES</b>	<b>VALORES MEDIOS DEL MODULO.</b>
Felt y Abrams	0.08 - 0.24
Inglés, O.G.	0.10 - 0.30
Portland 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.**

<b>Tabla 2.15 Módulo de Poisson.</b>			
<b>INVESTIGADORES</b>	<b>ESTÁTICO</b>	<b>DINÁMICO</b>	<b>TI PODE SUELO</b>
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.**

#### **h. 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. /cm<sup>2</sup> y 45.77 Kg. /cm<sup>2</sup> respectivamente. Así mismo, existen otros puntos de vista para la determinación del coeficiente de aporte “a”, Según Hodges<sup>14</sup> 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

---

<sup>14</sup> TRRL Laboratory, Report 673, U.K. 1975.

## 2.4. Diseño de Mezclas de suelo cemento.

### 2.4.1. 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.

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

Tabla 2.16 Requerimientos típicos para varios grupos de suelos

### Proporcionamiento.

Como se menciona antes, el ACI hace referencia a diferentes metodologías de proporcionamiento de mezclas de suelo-cemento que considera aceptable, de instituciones como La Portland 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.

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

\*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

**Fuente: ACI 230.1R**

**Tabla 2.17 Criterios de la PCA para ensayos de humedecimiento y secado o congelamiento – descongelamiento.**

- 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.

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

Fuente: ACI 230.1R

Tabla 2.18 USACE requerimientos de durabilidad

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

Fuente: ACI 230.1R

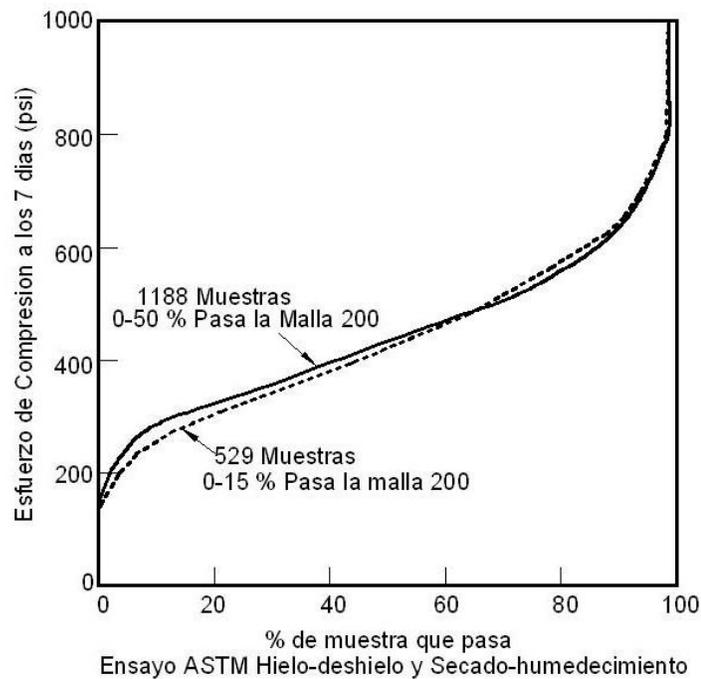
**2.19 USACE Criterios de resistencia a la compresión mínimo sin confinamiento lateral.**

- El criterio de diseño de U.S. Bureau of Reclamation (USBR) para protecciones de taludes de suelo-cemento en diques establece que las pérdidas máximas la protección de taludes de suelo-cemento de arena limosa. Además, USBR requiere un esfuerzo de compresión mínimo de 600 psi (42.3 kg/cm<sup>2</sup>) a 7 días y 875 psi (61.6 kg/cm<sup>2</sup>) a 28 días. Para prever variaciones en el campo, es práctica de USBR agregar un 2 % al contenido mínimo de cemento que se encuentra en todos los criterios de diseño anteriores.
- El Condado de Pima, Arizona, usa una cantidad considerable de suelo cemento para la protección de taludes en ríos y quebradas. El condado exige que el suelo cemento tenga una resistencia a la compresión mínima de 750 psi (52.8 kg/cm<sup>2</sup>) a los 7 días. El contenido de cemento es aumentado en un 2 % para aumentar la resistencia a la erosión y para compensar las variaciones de campo. Esto produce una resistencia a la compresión a los 7 días de aproximadamente 1000 psi (70.4 kg/cm<sup>2</sup>). Para facilitar las pruebas de control de calidad durante la construcción, el condado ha establecido un criterio de aceptación basado en determinar la resistencia a la compresión en 1 día. Para los suelos locales típicamente usados, la resistencia de 1 día está generalmente entre 50 a 60 por ciento del valor de 7 días.
- El Manual de Laboratorio de Suelo-cemento de la Portland Cement Association (PCA) describe un procedimiento de prueba rápido que puede usarse para determinar el contenido de cemento para suelos arenosos. El procedimiento usa ábacos desarrollados de pruebas anteriores en suelos similares. Las únicas pruebas requeridas son un análisis granulométrico, una prueba de densidad-humedad (proctor), y una prueba de esfuerzo a la compresión. Se necesitan muestras relativamente pequeñas. Todas las pruebas pueden completarse en un día, exceptuando la determinación del esfuerzo a la compresión a los 7 días.

## Consideraciones especiales

- Esfuerzo contra durabilidad, en muchas aplicaciones de suelo-cemento, deben reunirse requisitos de esfuerzo y durabilidad para lograr la vida de servicio satisfactoria. ASTM D 559 y D 560 son métodos de pruebas estándar dirigidas para determinar, en un suelo particular, la cantidad necesaria de cemento para mantener la masa unida permanentemente bajo esfuerzos de contracción y expansión que ocurren en el campo. Es práctica común, sin embargo, usar el esfuerzo a la compresión para determinar el volumen de cemento mínimo.

La Fig. 2.13 ilustra la relación general entre el esfuerzo a compresión y la durabilidad para suelo cemento. Está claro de estas curvas, que un esfuerzo de compresión de 800 psi (56.3 kg/cm<sup>2</sup>) sería adecuado para todos los suelos, pero este esfuerzo sería más alto que lo requerido para la mayoría de los suelos y produciría un diseño conservador y más costoso.



La Fig. 2.13 Relación general entre el esfuerzo a compresión y la durabilidad para suelo cemento.

La determinación del diseño más conveniente mediante el esfuerzo a la compresión se simplifica cuando se usan materiales dentro de un rango estrecho de graduaciones y/o tipos de suelo. Como resultado, algunas agencias han determinado y han usado con éxito, para un tipo particular de material, un requisito de esfuerzo a la compresión basado generalmente en resultados de las pruebas de humedecimiento-secado y congelamiento-deshielo.

- 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 disponible 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, acorde a ASTM D 1633). La mayoría de los valores de resistencia a la compresión proporcionados son basados en la relación  $h/d = 1.15$ . 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 1.15) por un factor de 1.10.

Relación h/D	1.75	1.50	1.25	1.00
Factor de Corrección	0.98	0.96	0.93	0.87

**Fuente: ASTM C 42.**

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

- 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.

## **2.4.2. Método según PCA.**

### **Método detallado de la PCA.**

El método de diseño de mezcla de suelo cemento de la PCA esta 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 ultima no aplica en El Salvador.
- f. Seleccionar el porcentaje de cemento comparando los resultados obtenidos con los de las perdidas 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/cm<sup>2</sup> 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 2.17 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 numero 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 húmedo, previamente saturados por inmersión en agua por cuatro horas.

El procedimiento general es el siguiente:

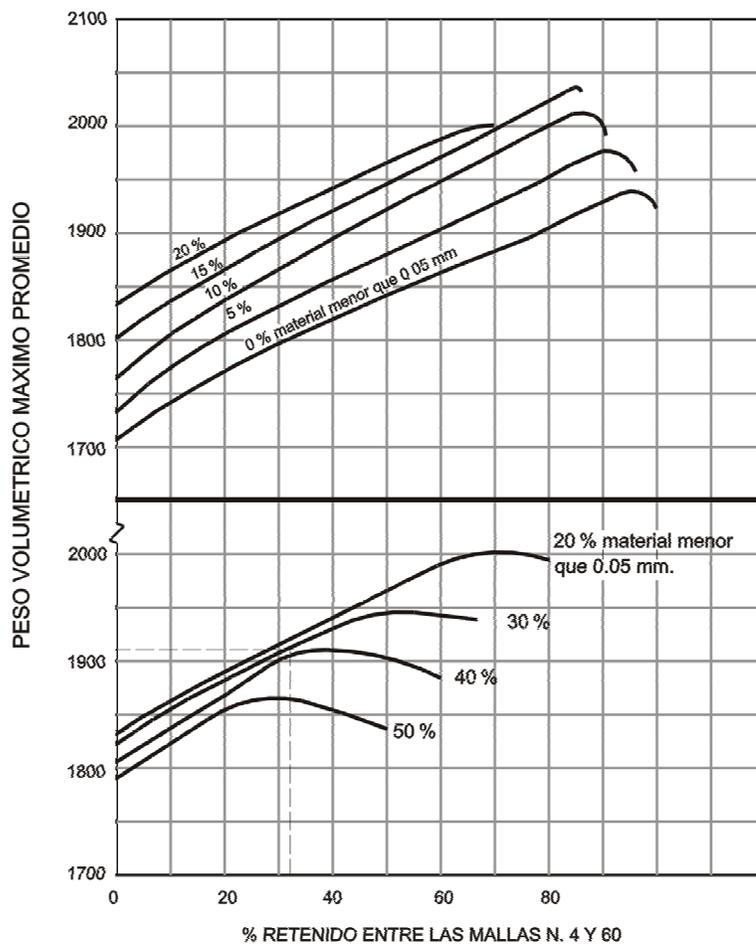
1. Se determina la granulometría del suelo.
2. Se determina el peso volumétrico del material retenido en la malla N° 4.
3. Si el suelo cumple los requisitos para aplicar el método, entonces se escogerá la variante que proceda.

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

- a. Con los datos del análisis granulométrico y la ayuda de la Fig. 2.14, 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.

2.15 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. 2.15 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. 2.16. 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. 2.17.



**Fig. 2.14. Estimación del peso volumétrico máximo promedio. Método Corto de la P.C.A.**

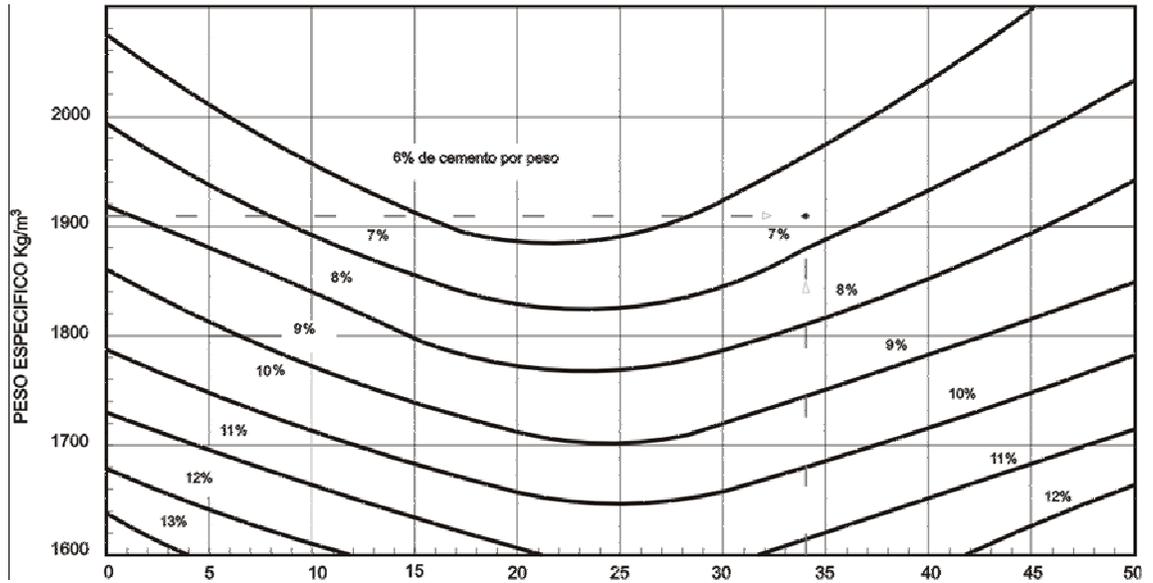


Fig. 2.15 Obtención de los contenidos de cemento de suelos que retienen material en malla N° 4

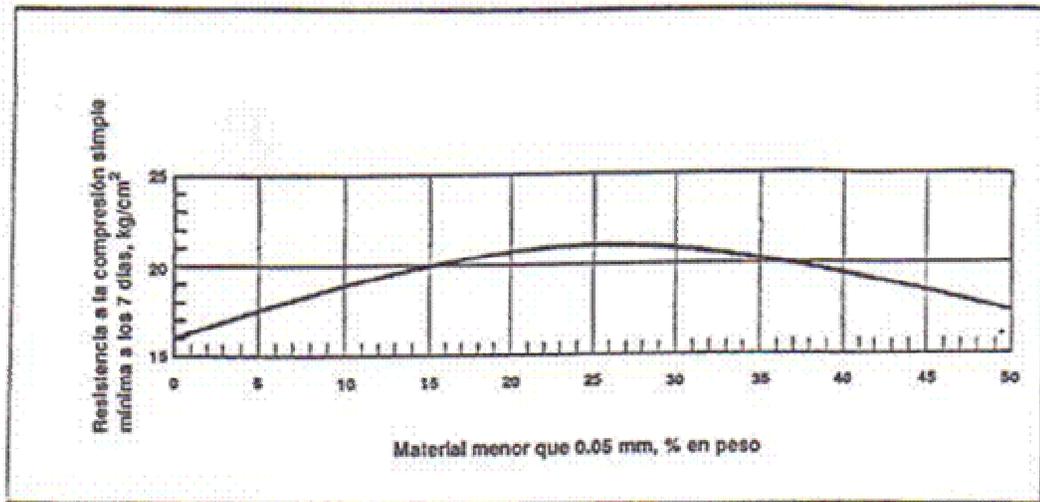


Fig. 2.16 Resistencia a la compresión simple a los 7 días.

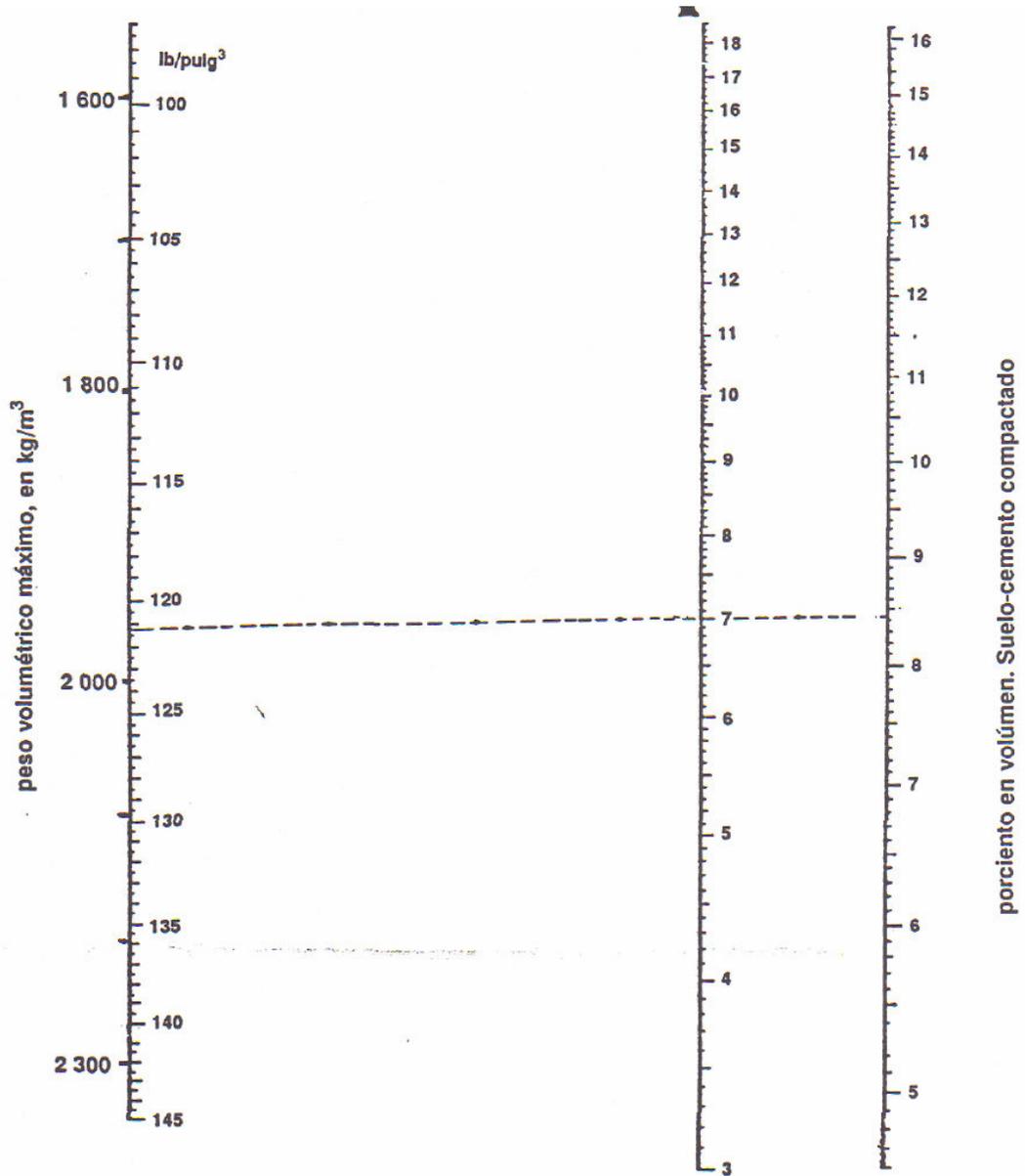


Fig. 2.17 Obtención del porcentaje de cemento en volumen a partir del porcentaje de cemento en peso, PCA.

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

- a. Obtener el peso volumétrico máximo promedio utilizando la Fig. 2.18.
- 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. 2.19.
- 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. 2.19
- 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. 2.20 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

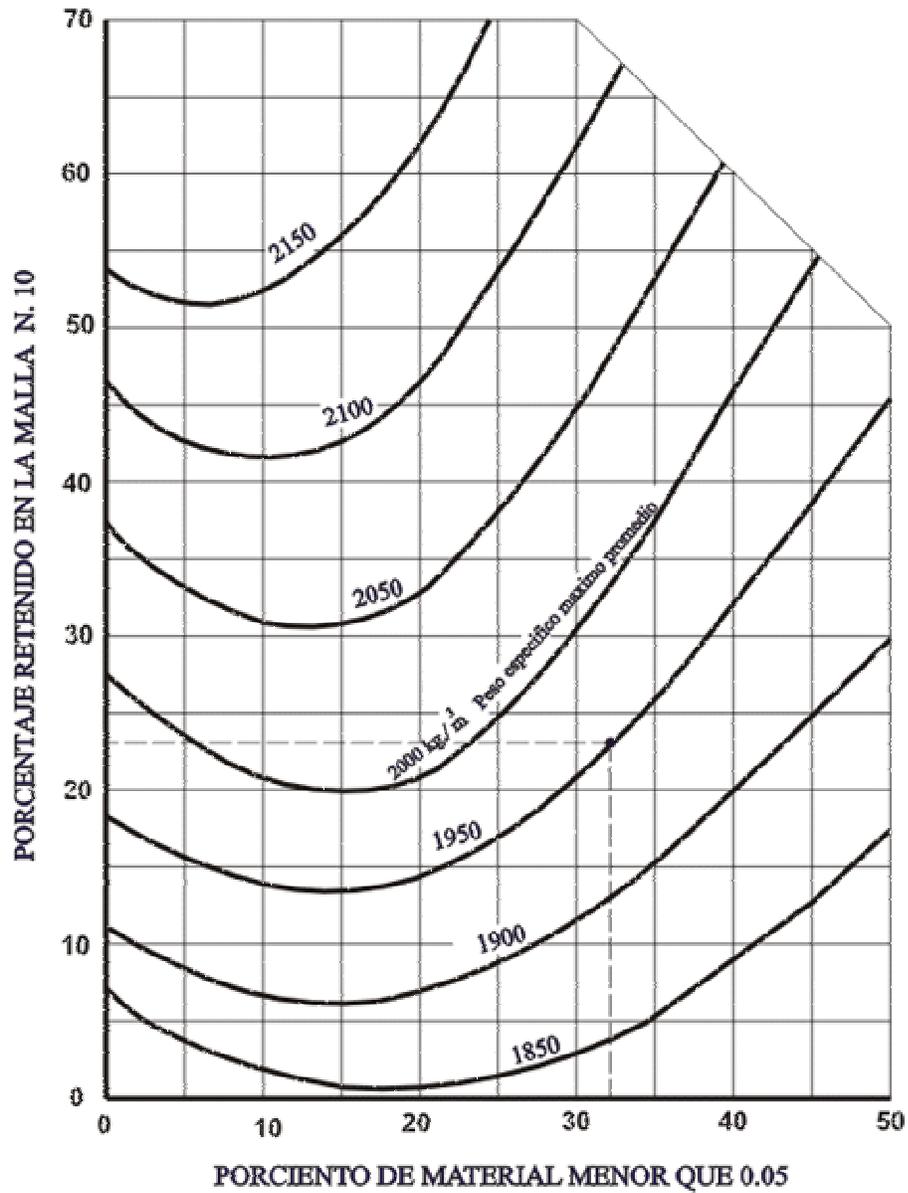
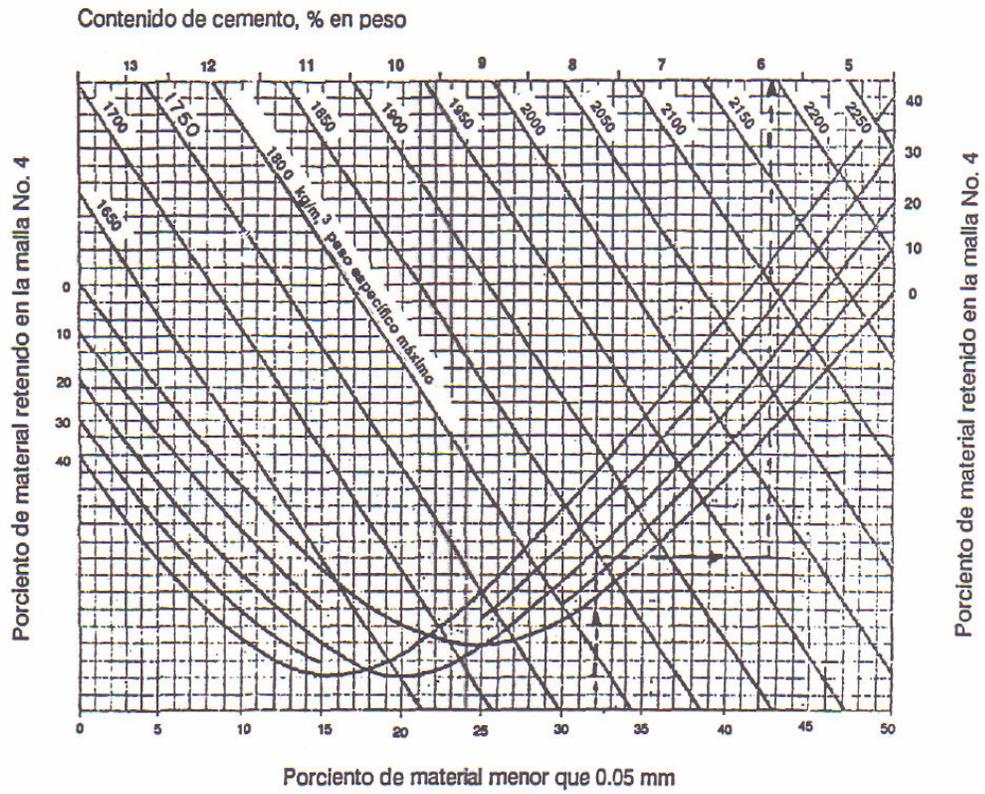


Fig. 2.18 Obtención de los pesos volumétricos máximos promedios.



**Fig. 2.19** Obtención de porcentajes de cemento para mezclas de suelo-cemento, PCA.

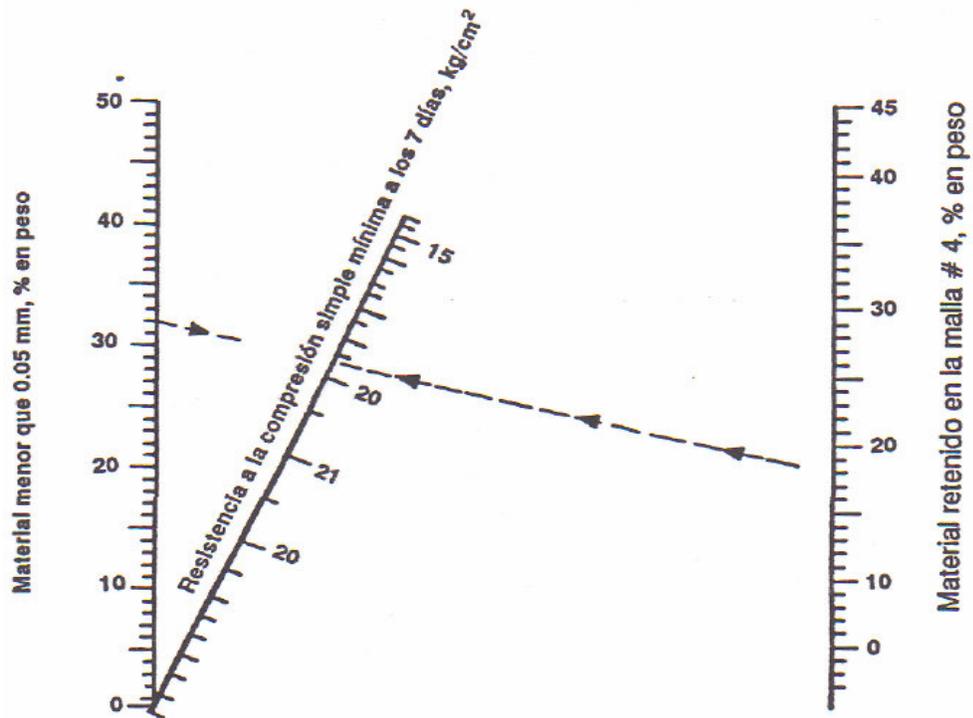


Fig. 2.20 Obtención de las resistencias a la compresión simple para mezclas, PCA.

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.

En nuestro país, el método corto de la PCA para el diseño de mezclas de suelo cemento es muy utilizado, pero con la variante que los especímenes son elaborados con una mayor energía de compactación, utilizando AASHTO T180 (Prueba Proctor Modificado), y las pruebas de humedecimiento y secado se realizan cada vez menos.

La experiencia en la utilización de dicho método en nuestro país, con las modificaciones mencionadas, ha sido muy exitosa ya que se ha logrado optimizar el costo de las mezclas por el uso de un menor contenido de cemento, incrementando la resistencia y durabilidad con una mayor energía de compactación aplicada.

El uso del método corto de la PCA para diseños de mezclas de suelo cemento, también se reporta en obras realizadas en otros países de América Latina.

### **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.

### **2.5. Diseño estructural de bases y subbases de suelo cemento.**

Los principales fundamentos en los que se basan los diversos métodos de diseño de espesores son diferentes, algunos consisten en criterios de experiencias, mediante la observación del comportamiento real de diversos pavimentos durante su periodo de servicio, otros se fundamentan en conceptos de fatiga y esfuerzos admisibles, existiendo también métodos de diseño de espesores que se apoyan en la resistencia al cortante en la superficie de contacto base-subbase. Actualmente, existen métodos modernos de cálculo avanzado que no son muy conocidos, dichos métodos se fundamentan en teorías mecanicistas o empírico-mecanicistas, que interactúan con relaciones modulares, clima y módulos dinámicos de cada material como el caso de la Guía de Diseño AASHTO 2002 (en fase de prueba).

Todos estos métodos de diseño han reportado buenos resultados en los casos donde el diseño estructural del pavimento se ha realizado adecuadamente. Es muy importante hacer énfasis en esto, ya que la determinación y cálculo del espesor de suelo cemento no implica el diseño estructural total del pavimento, el buen juicio en el diseño estructural e interrelación adecuada con las demás capas que conforman la estructura del pavimento, influirán en el buen desempeño de dicha estructura.

### **2.5.1. Metodología AASHTO.**

En nuestro país la metodología de diseño de estructuras de pavimento utilizado es la metodología AASHTO 1993. La finalidad del diseño de pavimentos tanto flexibles como rígidos, es determinar el espesor de las diferentes capas de la estructura basado en el nivel de tránsito como en las propiedades de los materiales; el período de desempeño de un pavimento esta en función de la pérdida de serviciabilidad.

#### **Pavimentos Flexibles:**

En general el diseño de espesores para pavimentos flexibles esta basado en el transito esperado, en el periodo de diseño, en el modulo de resiliencia y en el numero estructural, en este es que se pondera el aporte estructural que debe tener la capa de base de suelo cemento por medio del coeficiente estructural de capa correspondiente a dicha capa y en función de esto se diseña el espesor de la capa de base.

Hay que tener presente que la estructura de los pavimentos flexibles está integrada por la subrasante, subbase, base y superficie de rodamiento, el método AASHTO tiene como fin determinar los distintos espesores de las capas que conforman el paquete estructural.

Las variables a considerar en el método son las siguientes:

1. Variables en función del tiempo.
  - Periodo de diseño.

- Vida útil.
2. Variables en función del tránsito.
    - Número de repeticiones de ejes equivalentes de 18 kips ( 80 kN ) (ESAL´s).
  3. Confiabilidad.
  4. Subrasantes expansivas.
  5. Serviciabilidad.
  6. Propiedades de los materiales.
  7. Drenajes.

De acuerdo a la guía de diseño de pavimentos AASHTO 1993 la fórmula de diseño es la siguiente:

$$\text{Log}_{10} W_{18} = Z_r S_o + 9.36 \text{Log}_{10} (\text{SN} + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log}_{10} \left[ \frac{\Delta \text{PSI}}{4.2 - 1.5} \right]}{\frac{0.40 + 1094}{(\text{SN} + 1)^{5.19}}} + 2.32 \text{Log}_{10} M_r - 8.07$$

En donde:

$W_{18}$  = Número de cargas de ejes simples equivalentes de 18 kips (80 kN) calculadas conforme el tránsito vehicular.

$Z_r$  = Es el valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada para una confiabilidad R.

$S_o$  = Desviación estándar de todas las variables.

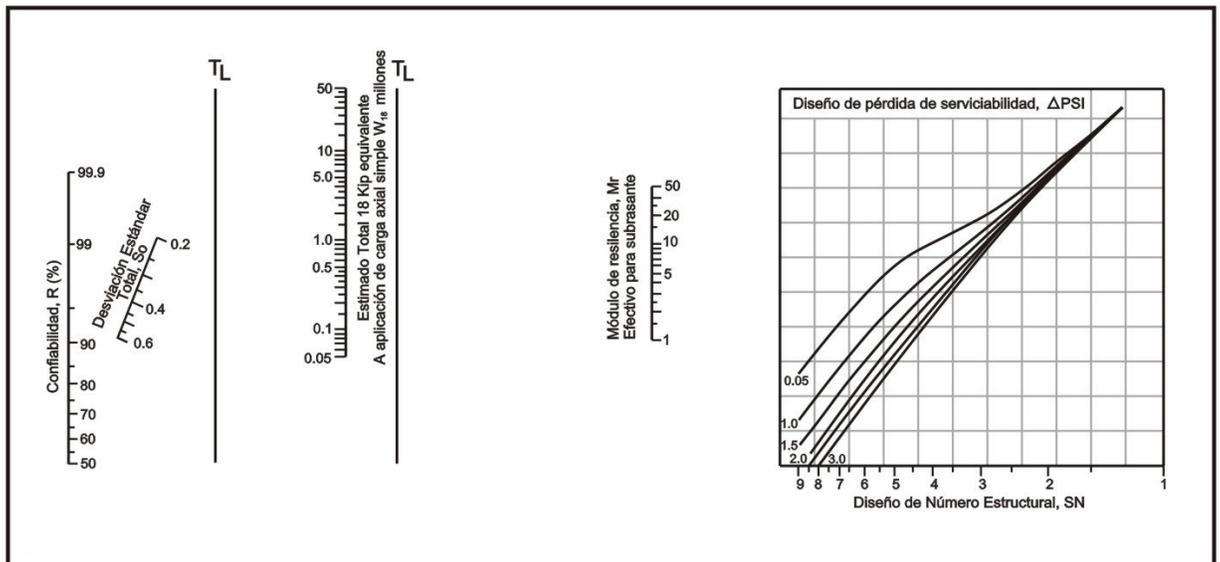
$\Delta \text{PSI}$  = Pérdida de serviciabilidad.

$M_r$  = Módulo de resiliencia de la subrasante.

$\text{SN}$  = Número Estructural

En los pavimentos de mezclas asfálticas por medio de la fórmula de diseño se obtiene el número estructural (SN) y en función del mismo se determinan los distintos espesores de las capas que conforman el paquete estructural; el diseño esta basado en la identificación del número estructural del pavimento flexible y la cantidad de ejes de carga transitando.

El procedimiento consiste en determinar el modulo de resiliencia de la subrasante, el transito esperado en el periodo de diseño, la serviciabilidad inicial y final, la desviación estándar y la confiabilidad, esta depende de la importancia de la vía donde será construida la estructura de pavimento ya que si la confiabilidad es mas alta el diseño de espesores será mas conservador. Al tener estas variables se puede calcular el numero estructural del pavimento mediante la formula de diseño presentada anteriormente o mediante el nomograma siguiente (fig. 2.21).



**Fig. 2.21** Nomogramas para el diseño de espesores en pavimentos flexibles.  
Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos AASHTO 93.

El número estructural esta relacionado con los espesores de las diferentes capas del paquete estructural, los diferentes coeficientes de capa y coeficientes de drenaje que los determina las condiciones de drenaje del pavimento como se muestra en la siguiente formula:

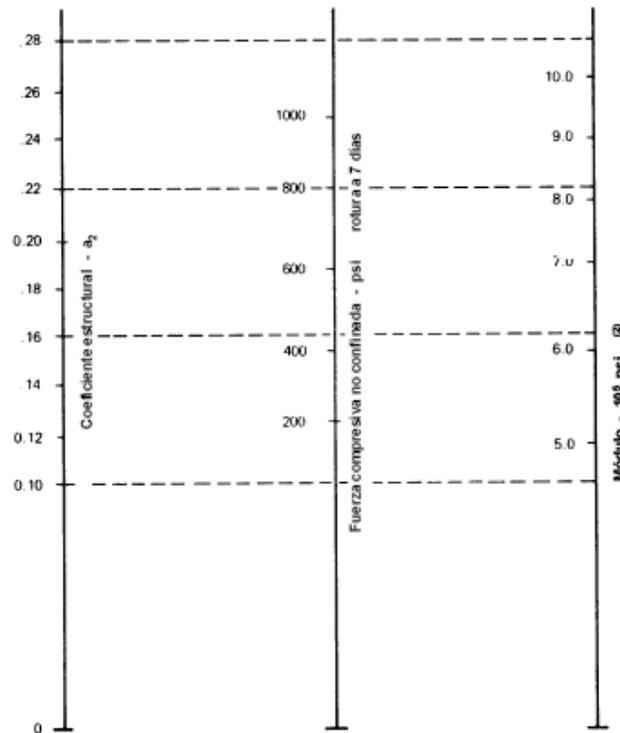
$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times m_2 \times D_2 + a_3 \times m_3 \times D_3$$

Donde:

- $a_1, a_2, a_3$  son los coeficientes estructurales ó de capa, de la superficie de rodadura, base y subbase respectivamente.
- $m_2, m_3$  son los coeficientes de drenaje para base y subbase.
- $D_1, D_2, D_3$  son los espesores de capa en pulgadas para la superficie de rodadura, base y subbase.

Los coeficientes de capa se pueden calcular por medio de una campaña de resistencia a la compresión y haciendo retrocalculo, la guía AASHTO 1993 presenta una grafica (fig. 2.22) en la cual se puede determinar el coeficiente de capa de una base estabilizada teniendo ya sea el modulo de resiliencia o la resistencia a la compresión. Al tener el coeficiente de capa de la base estabilizada con suelo cemento, el coeficiente de drenaje y el número estructural puede determinarse el espesor de la capa de base y de las demás capas del pavimento siguiendo normas establecidas por la guía como lo son la estabilidad y factibilidad de la construcción y determinar los espesores mínimos en función del numero estructural.

Figura 1-0  
Variación en el coeficiente estructural de la capa de base estabilizada



(1) Escala derivada de los porcentajes obtenidos de las correlaciones de Illinois, Louisiana y Texas  
(2) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)

Fig. 2.22 Variación en el coeficiente estructural de la capa de base estabilizada con cemento.  
Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos AASHTO 93.

El procedimiento de espesores mínimos en función del número estructural no es aplicable para determinar espesores de capas de suelo-cemento ya que estas tienen módulos de resiliencia mayores de 280 Mpa (40,000 PSI) que es el máximo permitido para usar este concepto; en estos casos, el espesor de la capa colocada sobre otra que tenga estas características, deberá ser definida por el costo-eficiencia de la misma ó utilizar espesores mínimos desde el punto de vista constructivo; esto quiere decir, que como la capa de abajo tiene un módulo de resiliencia alto, la capa que se coloque encima de ella deberá tener como mínimo un módulo de resiliencia igual ó mayor, y se decidirá si es necesario colocarla ó se utiliza el mínimo especificado.

## Pavimentos Rígidos:

Las variables que intervienen en el proceso de diseño son las siguientes:

1. Ejes simples equivalentes de 80 KN ( $W_{80}$ ) a lo largo del periodo de diseño.
2. Desviación normal estándar ( $Z_r$ ).
3. Error estándar combinado ( $S_o$ ).
4. Variación del índice de serviciabilidad ( $\Delta PSI$ ).
5. Coeficiente de drenaje ( $C_d$ ).
6. Coeficiente de transmisión de carga ( $J$ ).
7. Modulo de elasticidad del concreto ( $E_C$ ).
8. Factor de pérdida de soporte ( $L_S$ ).
9. Modulo de reacción ( $K$ ).

Para el método AASHTO la fórmula de diseño es:

$$\text{Log}_{10} W_{82} = Z_r S_o + 7.35 \text{Log}_{10} (D + 25.4) - 10.39 + \frac{\text{Log}_{10} \left( \frac{\Delta PSI}{4.5-1.5} \right)}{1 + \frac{1.25 \times 10^{10}}{(D + 25.4)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32P_f) \times \text{Log}_{10} \left( \frac{M_r C_{dr} (0.09D^{0.75} - 1.132)}{1.51 \times J \left( 0.09D^{0.75} - \frac{7.38}{(E_c/k)^{0.25}} \right)} \right)$$

En donde:

$W_{18}$  = Número previsto de ejes equivalentes de 8.2 toneladas métricas, a lo largo del período de diseño.

$Z_r$  = Desviación normal estándar

$S_o$  = Error estándar combinado en la predicción del tránsito y en la variación del comportamiento esperado del pavimento

$D$  = Espesor de pavimento de concreto, en milímetros

$\Delta PSI$  = Diferencia entre los índices de servicio inicial y final

$P_t$  = Índice de serviciabilidad o servicio final

$M_r$  = Resistencia media del concreto (en Mpa) a flexotracción a los 28 días (método de carga en los tercios de la luz)

$C_d$  = Coeficiente de drenaje

$J$  = Coeficiente de transmisión de cargas en las juntas

$E_c$  = Módulo de elasticidad del concreto, en Mpa

$k$  = Módulo de reacción, dado en Mpa/m de la superficie (base, subbase o subrasante) en la que se apoya el pavimento de concreto.

Para encontrar el modulo de reacción  $k$  se hace uso del nomograma de la Figura 2.23, en el que se tienen como variables de entrada el Módulo de resiliencia de la subrasante, el espesor de la subbase (valor propuesto) y el coeficiente de elasticidad de la misma, con ellos se obtiene el Módulo de reacción compuesto de la subrasante, que es uno de los parámetros que se utilizan para entrar al nomograma de la figura 2.24 que es el que permite encontrar el espesor de la losa de concreto.

Nomograma para determinar el módulo de reacción compuesto de la subrasante, suponiendo una profundidad infinita

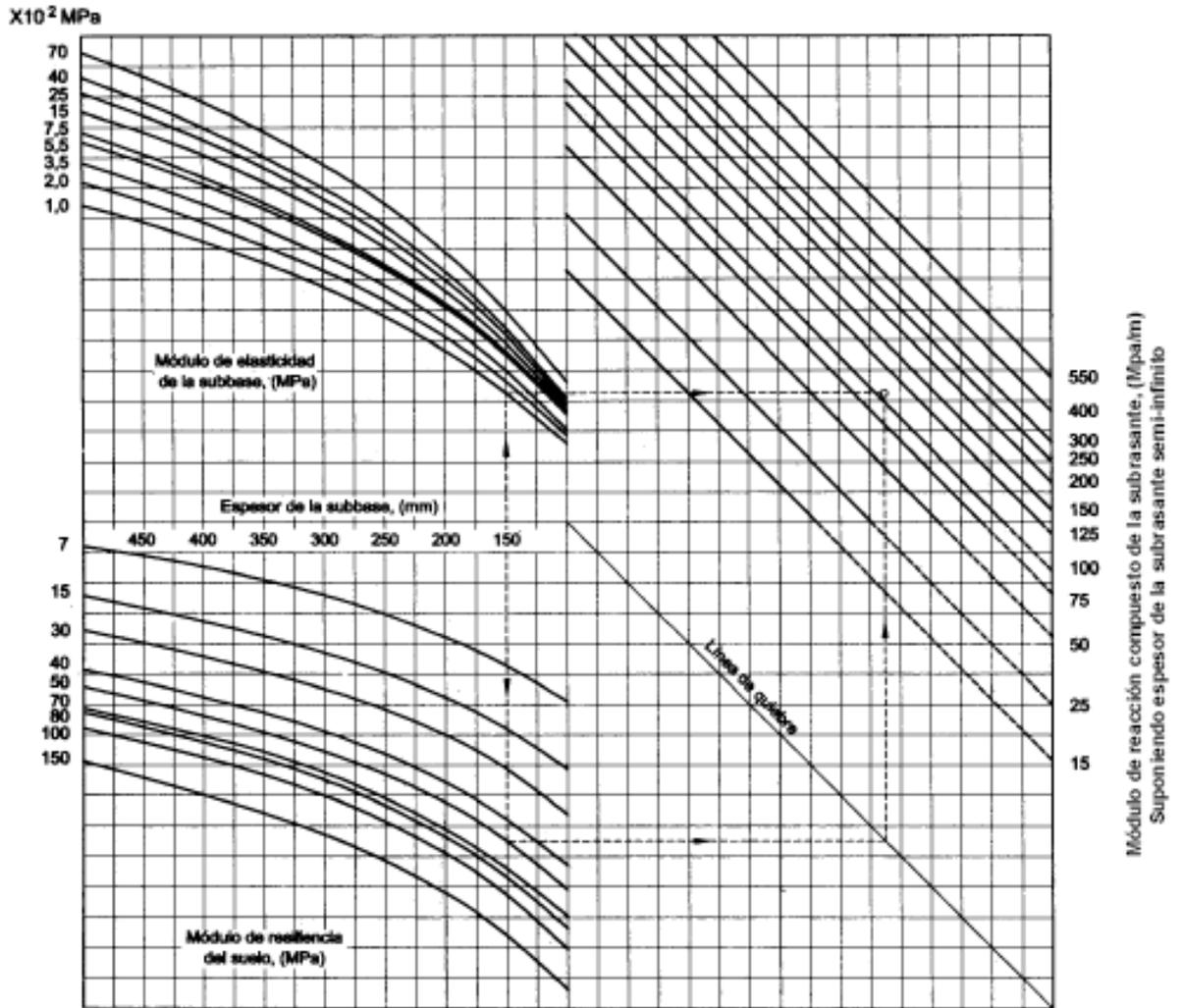


Figura 2.23 nomograma para determinar el modulo de reacción compuesto de la subrasante, suponiendo una profundidad infinita y asumiendo un espesor de subbase. Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos AASHTO 93.

Para facilitar la utilización de la ecuación AASHTO presenta el siguiente nomograma para el cálculo de espesor del pavimento de concreto:

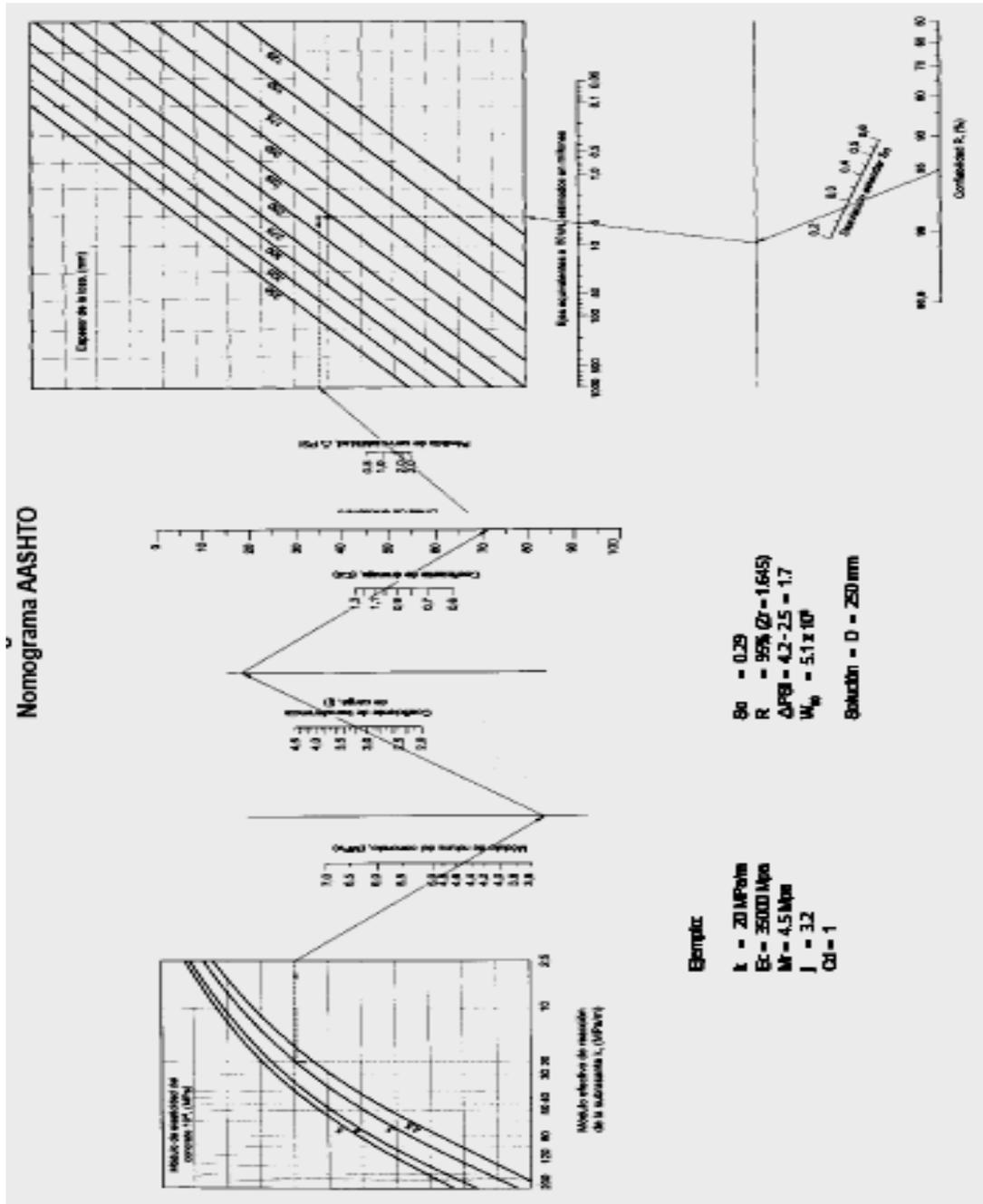


Figura 2.24 nomograma para determinar el modulo de reacción compuesto de la subrasante, suponiendo una profundidad infinita y asumiendo un espesor de subbase.  
 Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos AASHTO 93.

▪ **Generalidades de la Metodología AASHTO 2002.**

En este apartado no se pretende profundizar en el diseño estructural, sino describir brevemente los criterios y parámetros estructurales que se necesitan para calcular espesores.

Existen métodos modernos de cálculo avanzado que no son muy conocidos, dichos métodos se fundamentan en teorías mecanicistas o empírico-mecanicistas, que interactúan con relaciones modulares, clima y módulos dinámicos de cada material como el caso de La Guía de Diseño AASHTO 2002 que contiene una base mecanicista, apoyada en la teoría de la elasticidad y en la aplicación de modelos de deterioro de pavimentos.

**Diseño Mecanicista-Empírico.**

- Combina aspectos mecanicistas y empíricos.
- Involucra componentes mecanicistas para determinar la respuesta del pavimento debido a cargas a través de modelos matemáticos.
- Los componentes empíricos relacionan las respuestas del pavimento con su funcionamiento.
- Cada tipo de deterioro se asocia a una respuesta crítica del pavimento.

La guía de diseño AASHTO 2002 representa un mayor cambio en la forma del desarrollo del diseño del pavimento. El diseñador considera en primer lugar condiciones de sitio como tráfico, clima, subrasante y en segundo lugar una propuesta de un diseño de prueba que se ajusta de acuerdo a los comportamientos estructurales y funcionales obtenidos.

El diseñador está completamente envuelto en el proceso de diseño y tiene la flexibilidad para considerar diferentes características de diseño y materiales predominantes del sitio.

Yoder y Witczak (1975) señalaron que el proceso de diseño de cualquier pavimento para ser completamente racional, se deben considerar tres elementos primordiales, los cuales la Guía de Diseño considera:

- La teoría para predecir las fallas asumidas ó parámetros de deterioro.
- La evaluación de las propiedades de los materiales aplicables a la teoría seleccionada.
- La determinación entre la relación de la magnitud de los parámetros en cuestión al nivel de desarrollo deseado.

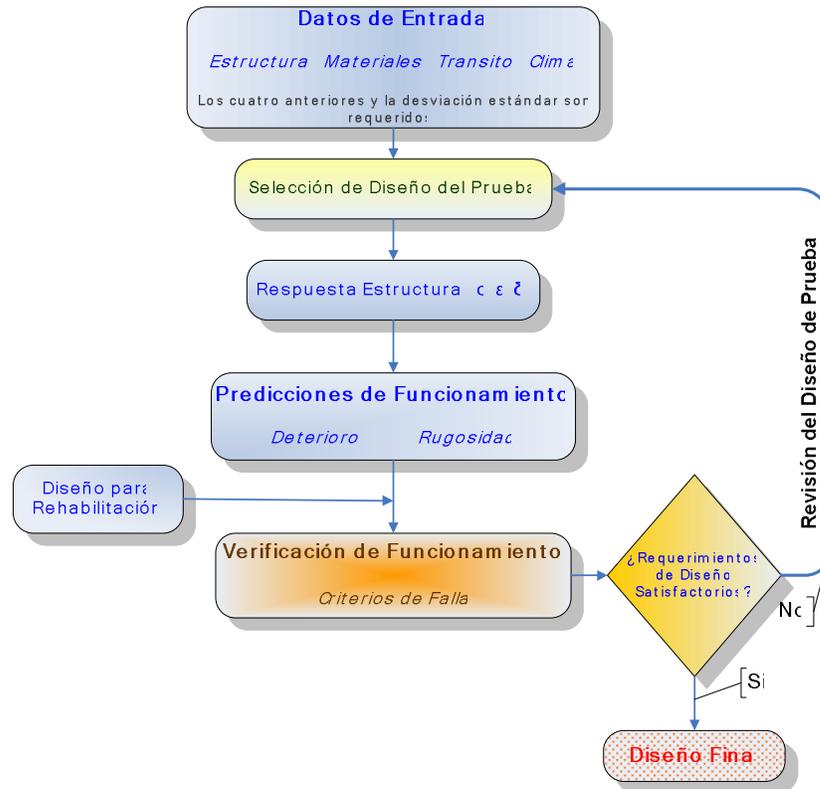
#### **Beneficios del diseño Mecanicista-Empírico.**

- El diseño ya no es solo para el espesor de la estructura.
- Aproximación comprensiva incluyendo consideraciones estructurales y de los materiales.
- Manejo mejorado de efectos climáticos y diseños de seguridad.
- Nuevos Conceptos:
  - Funcionamiento basado en deterioros y calidad de la carretera.
  - Mejor caracterización de pavimentos existentes.
  - Consideraciones directas de drenaje y erosión de la subbase.
- Adaptabilidad:
  - Mejor habilidad para manejar las características cambiantes del tránsito.
  - Capacidad para incorporar materiales pavimentados disponibles.
  - Capacidad de extrapolar de los estudios de campo y laboratorio.

#### **Estructuras y Componentes del diseño Mecanicista-Empírico.**

El siguiente flujograma genérico, forma la base para la mayoría de diseños mecanicista-empírico Fig. 2.25. No hay arreglos de los componentes que existen en el proceso. Se enfatiza que la naturaleza iterativa del proceso de diseño es muy diferente de los procesos de diseño “paso a paso” basados en el cálculo de espesor.

También se acentúa que los criterios del funcionamiento contra los cuales el diseño será comprobado se incorporarán al flujoograma como entradas de datos.



**Fig. 2.25. Estructura del diseño Mecanicista-Empírico.**

**Fuente: Guía para el uso del método de diseño de estructuras de pavimentos nuevos según método AASHTO 2002.**

La Guía AASHTO 2002 para el diseño de bases o subbases de pavimentos, considera las características mecánicas de los materiales a ser utilizados, a diferencia de las guías anteriores en las cuales se diseñan los espesores basados en experiencias foráneas, por lo que este método permite tener espesores mas exactos de bases o subbases de suelo cemento o cualquier otro material a ser utilizado y de las diferentes capas que componen la estructura de un pavimento.

### **2.5.2. Método según PCA.**

Los fundamentos principales en los cuales se basa este método son los criterios de resistencia y durabilidad exigidos por la PCA, asimismo se exige que la construcción se haga siguiendo las normas correspondientes.

#### **Fundamentos principales.**

- a. El número de repeticiones de carga que produce la falla del pavimento es función del radio de curvatura en flexión.
- b. El comportamiento debido a la fatiga varía ampliamente de acuerdo al tipo de suelo usado en la mezcla, por tal motivo se acordó dividir los suelos en dos grupos: granulares y finos. De acuerdo con la clasificación AASTHO son:

Suelos granulares: A-1, A-3, A-2-4 y A-2-5.

Suelos finos: A-2, A-2-7, A-4, A-5, A-6 y A-7.

#### **Procedimiento del método.**

Los parámetros que intervienen son:

- a. Capacidad de soporte de la subrasante: Evaluada por medio del modulo de reacción  $k$ , determinado por ensayos de placa de carga AASHTO T222, o a través de correlaciones con valores de CBR.
- b. Periodo de diseño.
- c. Transito.
- d. Calidad del suelo cemento.

La calidad del suelo cemento se mide por su resistencia a la falla por fatiga, tomando como unidad de consumo de fatiga la correspondiente a mil ejes sencillos de 8.2 ton. En función de esta unidad, se ha cuantificado el consumo de fatiga ocasionado

por las distintas cargas de eje sobre el suelo cemento elaborado con suelos granulares o con suelos finos. Los valores de estos coeficientes se muestran en la Tabla 2.21 basta para ello multiplicar el número esperado de repeticiones de cada eje (tomado en miles) por su correspondiente coeficiente de "consumo de fatiga" para obtener el "Factor Fatiga" de tal eje. La suma de los factores de fatiga por eje proporciona finalmente el "Factor Fatiga del suelo-cemento".

- e. Espesor de la capa de suelo cemento: Con los gráficos que proporciona el método se determina el espesor total en función del modulo  $k$  de la subrasante, del factor fatiga del pavimento y del tipo del suelo cemento (elaborado con suelo grueso o fino).

La Fig. 2.26 permite determinar el espesor total en función del módulo  $K$  de la subrasante, del factor fatiga del pavimento y del tipo del suelo-cemento (hecho con suelo grueso o fino).

- f. Recubrimiento: Como norma general, el suelo-cemento debe estar provisto de un recubrimiento que sirva como capa de rodadura y lo proteja de la erosión causada por el agua y de la abrasión producida por las llantas en el movimiento y la frenada de los vehículos. Por otra parte, la colocación de un recubrimiento contribuye a mejorar la capacidad estructural del pavimento y permite, por tanto, reducir el espesor calculado de acuerdo con la Fig. 2.26 proporcionada por la PCA, o bien por otro criterio. En la Tabla 2.22 se indican las recomendaciones de espesores para la carpeta asfáltica de la PCA.

<b>Tabla 2.21. Coeficientes de consumo de fatiga. P.C.A.</b>		
<b>CARGA POR EJE (ton)</b>	<b>SUELO-CEMENTO Tipo granular</b>	<b>SUELO-CEMENTO Tipo granular con finos</b>
<b>EJES SIMPLES</b>		
13.6	12500,000.0	3,530.0
12.5	1 270,000.00	1,130.0
11.8	113.200.0	337.0
10.9	8,650.0	93.0
10.0	544.0	23.3
9.1	77.0	5.2
8.2	1	1
7.3	0.250	0.1600
6.4	.0004	0.0200
5.4		0.0018
<b>EJES EN TÁNDEM</b>		
22.7	12500,000.0	3,530.0
21.8	3210,000.0	1,790.0
20.8	792,000.0	890.0
20.0	186,000.0	431.0
19.0	41 ,400.0	203.0
18.1	8,650.0	93.0
17.2	1,690.0	41.1
16.3	305.0	17.5
15.4	50.4	7.1
14.5	7.5	2.74
13.6	1	1
12.5	0.1200	0.3410
11.8	0.0120	0.1070
10.9	0.0010	0.0310
10.0		0.0081
9.1		0.0018

**Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, thickness Design for soil-cement pavements.**

Tabla 2.22 Espesores de carpeta asfáltica		
ESPELOR DEL SUELOCEMENTO (cm)	ESPELOR RECOMENDADO DE CARPETA (cm)	ESPELOR MÍNIMO DE CARPETA (cm)
125-15	2-4	TBSS*
17.5	4-5	TBSD
20.0	4-6.5	2,5
22.5	5-7.5	5

\*TBSS = Tratamiento asfáltico superficial simple.  
 \*\*TBSD = Tratamiento asfáltico superficial doble.

Fuente: PCA, thickness Design for soil-cement pavements.

GRAFICAS PARA EL DISEÑO DE ESPESORES DE CAPAS DE SUELO-CEMENTO P.C.A.

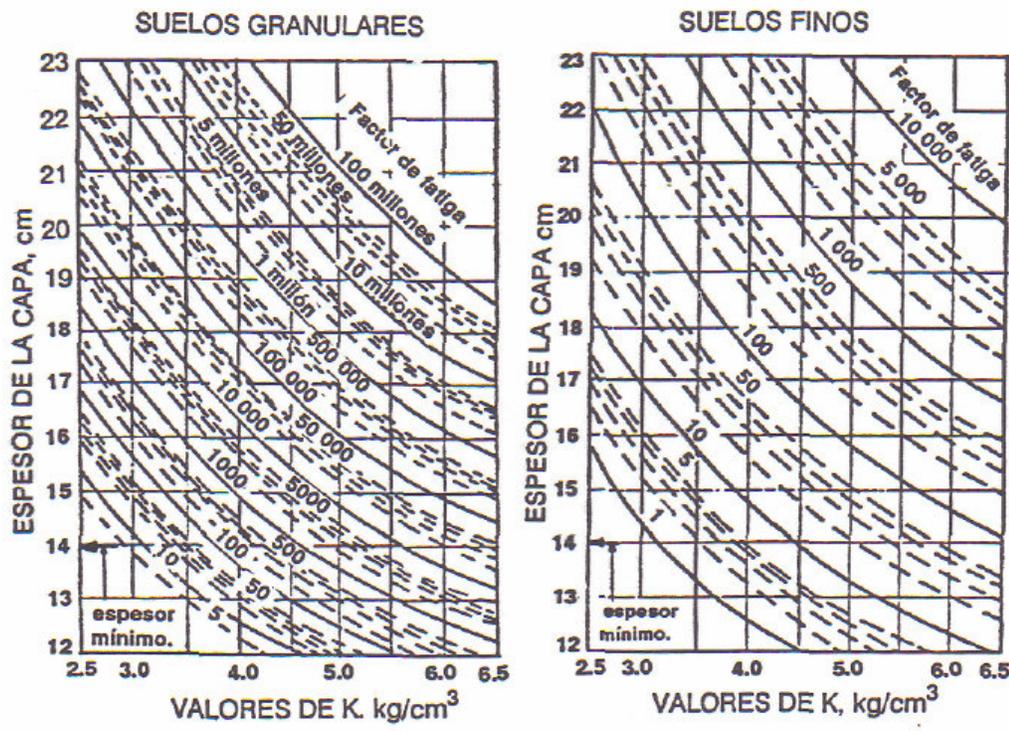


Fig. 2.26 Monogramas para el diseño de espesores de suelo-cemento en pavimentos. PCA. Fuente: PCA, thickness Design for soil-cement pavements.

Este método de cálculo de espesores de la PCA, es muy conocido en muchos países de América, sin embargo, es común que los diseños estructurales sean realizados utilizando la Guía de diseño de estructuras de pavimentos AASHTO1993, en donde es posible diseñar el espesor de base de suelo cemento en conjunto con las demás capas que conforman la estructura de pavimento.

## **2.6. 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.

### **2.6.1. 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.

### **2.6.2. 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.

### **2.6.3. 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. Existe una tercer forma de realizar el proceso, que es utilizando plantas mezcladoras viajeras, pero en el país no es una práctica común por la disponibilidad de estas.

#### **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 pueden 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<sup>15</sup>. La escarificación consiste en arañar la superficie del terreno para disgregar superficialmente el material, sacar materiales indeseados o crear adherencia entre capas. Para aumentar el rendimiento de esta actividad es común utilizar maquinas como motoniveladoras, bulldozers o equipo agrícola, este ultimo puede utilizarse para esta actividad, y no así para el mezclado de suelo y cemento debido a que la uniformidad de la mezcla no es buena<sup>16</sup>; Cuando el escarificado ha alcanzado la extensión y profundidad requerida se vuelve a conformar el suelo ya preparado, en capas de espesor y ancho uniforme.

Algunos contratistas acostumbran hacer una leve compactación para obtener una superficie de trabajo adecuada que permita distribuir el cemento en cantidades exactas.

### **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.

---

<sup>15</sup> ACI 230 1R sugiere que se humedezca el suelo con una humedad cercana a la humedad óptima, para que la pulverización sea eficaz.

<sup>16</sup> ACI 230 1R.

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. Este método ha sido desplazado por maquinaria más moderna porque su forma de dosificar se basa en la abertura del esparcidor y la velocidad del vehículo y, a menos que se cuente con operadores altamente entrenados en esta rutina, el resultado no ofrece gran confiabilidad.

El esparcidor automático tiene un sistema que equilibra la velocidad del carro con la de un tornillo sinfín dispuesto en el cuarto de almacenamiento, el cual empuja el cemento hacia un rociador que tiene en su parte posterior y éste, a su vez, se encarga de homogeneizar la caída del cemento. Este equipo ofrece una mayor confiabilidad que el equipo mecánico. La utilización de este método depende en gran medida de la disponibilidad del equipo.

- Dosificación del Cemento en bolsas o sacos.

Conociendo el contenido de cada bolsa (42.5 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:

$$V = ( A \times E \times L ) \times \%Cem. = 42.5 \text{ Kg.}$$

*Donde:*

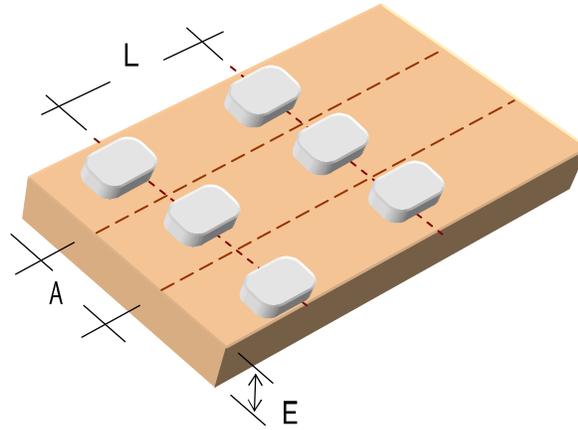
*A* : Ancho del carril elegido.

*L* : Longitud relativa a cada saco.

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

42.5 Kg.: Peso de la bolsa de cemento.

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



**Fig. 2.27 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. 2.27 ilustra mejor las variables.

Después de extender el cemento se procede al regado superficial con personal debidamente protegido, pues el proceso genera cantidades considerables de polvo, que son nocivas para el cuerpo humano en exposiciones largas de tiempo.

- 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.

Para la dosificación por vía húmeda se hace necesario un equipo adicional encargado de mezclar agua y cemento en forma de lechada, para luego ser inyectada en el equipo mezclador según la velocidad de marcha y la dosificación establecida. Este tipo de configuración se conoce como tren de estabilización y se caracteriza por sus altos rendimientos, que pueden llegar a ser de varios Km./día. Las condiciones necesarias para la aplicación de este método por vía húmeda son bastante exigentes, pues requieren grandes volúmenes de construcción que justifiquen el costo de los equipos, alineamientos que permitan el libre funcionamiento del tren de estabilización y condiciones de humedad que no impidan la incorporación del cemento por vía húmeda. Por eso sólo se utiliza en grandes proyectos viales en países industrializados.



**Fig. 2.28 Equipo utilizado para la dosificación de cemento por vía húmeda.**

### **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 sollicitaciones 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.

A través de los últimos años se ha desarrollado la tecnología y los métodos para realizar el mezclado, a continuación se describen algunos:

- Mezclado con motoniveladora.

Aunque no es un equipo diseñado para realizar mezclas, para pequeños proyectos el resultado obtenido con estas maquinas es satisfactorio, siempre y cuando se tomen en consideración ciertas precauciones:

- Un excelente operador de motoniveladora, para emprender el mezclado y garantizar la remoción de un porcentaje importante de los grumos formados en un tiempo que no supere el establecido en los parámetros iniciales.
- El suelo debe estar en un punto tal de humedad que no se formen grumos difíciles de desintegrar, pero debe tener el agua necesaria para permitir la mezcla sin que se presente segregación del material.
- El proceso debe ser acompañado de inspección visual permanente para indicar lugares con variación de color, indicativo de falta de homogeneidad en la mezcla.

En conclusión se puede decir que la motoniveladora funciona en procesos en donde no sean requeridos grandes rendimientos como en pequeñas calles, pequeños caminos de longitud corta, mientras que para proyectos viales propiamente dichos no son adecuados por su poca eficiencia.

- Mezclado con equipos rotativos.

Las mezcladoras rotativas han tenido avances significativos permitiendo garantizar la homogeneidad de las mezclas de suelo estabilizado.

El proceso del mezclado es muy sencillo, cuando se tiene distribuido el cemento sobre la vía, se siguen los siguientes pasos:

- Se define la línea de acción de la estabilizadora, las cuales normalmente oscilan en anchos de rotor entre 2 y 2.5 m.
- De acuerdo con el tipo de suelo se establece la velocidad del rotor y la velocidad de marcha para las cuales la granulometría y homogenización del suelo es óptima.
- Una vez se tenga el plan de trabajo, se dispone el equipo al comienzo de la línea indicada, se opera el rotor a la velocidad seleccionada, se aseguran la cubierta del rotor, se baja el rotor al corte y se comienza la marcha de estabilización.
- Cuando la máquina haya estabilizado algunos metros, el ingeniero a cargo debe controlar la granulometría y coloración del material estabilizado, verificando el desempeño de la configuración del equipo.

Es esencial tener este control antes del proceso de perfilación y compactación final.

Gran parte de las dificultades a tener en cuenta en el proceso de mezclado pueden ser fácilmente solucionadas por el ingeniero a cargo. Estos inconvenientes se presentan por la lluvia, las condiciones geométricas locales de los lugares a estabilizar y la humedad propia del suelo. Sin embargo rara vez es necesario suspender los trabajos por las particularidades presentadas en el mezclado de los materiales.

### **Suelo cemento en planta.**

Por ser mezclado en un lugar ajeno a la colocación consta de dos etapas diferentes: la mezcla y la colocación.

#### **Mezcla.**

En general las diferencias establecidas entre el suelo-cemento In situ y el mezclado en planta sólo se circunscriben a la etapa de mezclado, pues tanto los preliminares como las etapas post extendida de la mezcla no difieren sustancialmente.

Cuando la mezcla del suelo-cemento es concentrada en un solo sitio se tiene un control exacto sobre los materiales que intervienen en el proceso, pues su dosificación se puede hacer fácilmente por peso.

El no tener que estabilizar el material encontrado en el sitio permite hacer uso de bancos de préstamo escogidos por el ingeniero de vías y garantizar que el material que será estabilizado tenga, en el peor de los casos, propiedades mejores que las del material existente en la vía.

Debe tenerse en cuenta que, tanto por dificultad en el mezclado como por la prevención de fisuras, los materiales arcillosos resultan perjudiciales en el proceso y sólo deben ser utilizados en casos donde no se encuentre otro tipo de material, preferiblemente arenoso, cerca al sitio del proyecto.

Con el fin de establecer diferencias que permitan tomar la decisión de cuál sistema de mezclado utilizar, se plantean las ventajas y desventajas del proceso:

Ventajas:

- Por tratarse de un proceso controlado, se garantizan la homogeneidad y la correcta dosificación de la mezcla.
- Por realizarse en un lugar especial para la mezcla, se independiza de las condiciones climáticas del lugar de trabajo, reduciendo así los imprevistos por lluvia y evitando el riesgo de perder el material.
- Se reduce a cero la posibilidad de evaporación durante el mezclado, lo cual garantiza un fraguado controlado y la posibilidad de disminuir la fisuración.
- En sistemas bien compensados entre equipos de colocación, transporte y mezclado pueden alcanzarse altos rendimientos.

#### Desventajas:

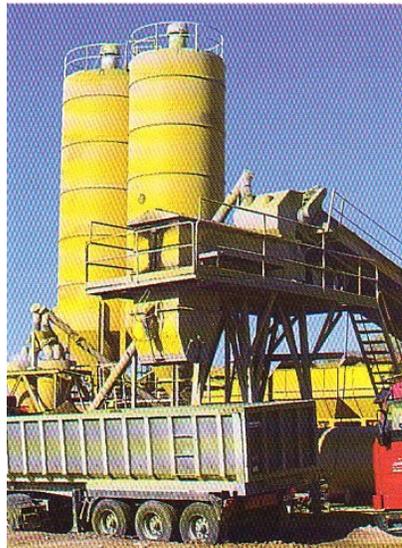
- La falta de versatilidad del equipo de mezclado hace que pueda resultar muy costoso para proyectos de tamaños medios a bajos.
- Necesidad de pulverización previa cuando se mezclan suelos plásticos, pues éstos pueden adherirse a las paletas y paredes del equipo impidiendo el mezclado.
- Tal vez la más importante desventaja del método es el alto costo de los acarrees, lo que finalmente hace viable los proyectos de suelo-cementó vs. Alternativas convencionales, en donde el volumen de acarrees es grande. Sin embargo, en países donde el método es bastante utilizado, podemos observar diferentes tipos de plantas, desde las grandes plantas fijas de altísima producción hasta las pequeñas plantas portátiles de fácil transporte que reducen los acarrees de material.

#### **Transporte y colocación.**

Para llevarlo de la planta al lugar de trabajo se deben tener las siguientes consideraciones: Los camiones utilizados deben tener posibilidad de hacer la descarga rápidamente, los más utilizados son los camiones de volteo de 12 a 24 m<sup>3</sup>.

El transporte en los camiones de volteo debe realizarse con la carga tapada por medio de plásticos o carpas que garanticen que el agua de la mezcla no se evapore por acción del viento.

La planta no debe estar a más de 30 minutos del lugar de trabajo. El estado de funcionamiento de los camiones debe verificarse periódicamente para minimizar los imprevistos que puedan hacer perder la mezcla transportada.



**Fig. 2.29 Producción de suelo cemento en planta.**

Una vez transportada la mezcla al lugar de trabajo la colocación puede hacerse de dos formas distintas. Para cada una de ellas se deben tener ciertas consideraciones:

- 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.



**Fig. 2.30** 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.



**Fig 2.31** Colocación de suelo cemento con Fínisher.

Una vez las mezclas sean extendidas en la vía por cualquiera de los métodos anteriores, se procede de acuerdo al método expuesto para mezclas in situ.

#### **2.6.4. 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<sup>17</sup>. 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.

Durante el mezclado ocurre una pérdida de humedad debido a la evaporación, que es perceptible por el cambio de color de la superficie (se vuelve color gris), y debe compensarse con ligeras aplicaciones de agua.

---

<sup>17</sup> ACI 230 1R.

Para llevar el material ya mezclado a su posición final, con los espesores de capa y áreas requeridas, se recomienda el siguiente procedimiento:

- Pasada del vibro compactador sin vibración.

Esta pasada estática del vibro compactador puede reducir el espesor post mezclado y de esta forma dejar el material en condiciones más accesibles para ser conformado por la moto niveladora. Además, por tratarse sólo de la acción por peso del vibro compactador, se evita la creación de grumos y no se aceleran las condiciones de fraguado.

- Conformación con la moto niveladora.

Este proceso es ampliamente conocido por los operadores del equipo y consiste básicamente en extender el material hasta alcanzar las cotas deseadas que cumplan con todos los requerimientos de la vía, pendientes, bombeos, peraltes, etc. Debe tenerse en cuenta que en el proceso anterior del vibro compactador se genera una precompactación superficial que, cuando entra la motoniveladora, da como resultado una serie de costras que tienen que ser removidas por el operador en un proceso de amasado del material con la cuchilla antes de alcanzar las cotas deseadas.

- Determinación de la humedad.

Según el resultado de humedad obtenida de una muestra después de la estabilización, se toma la decisión de incorporar agua al material. Generalmente el material llega a esta instancia por debajo de la humedad óptima debido al proceso a que ha sido sometido, pues la estabilizadora baja un poco la humedad, igual que la motoniveladora al redistribuir el material. En cualquier caso se aconseja compactar uno o dos puntos por encima de la humedad óptima porque el cemento, como material incorporado, absorbe gran cantidad de agua en el proceso de fraguado.

- Compactación final.

Se busca dejar el material estabilizado en las condiciones finales de funcionamiento. Para ello se puede utilizar un vibro compactador, para agilizar el proceso de compactado, haciéndolo pasar el número de veces necesarias, teniendo en cuenta que esté configurado en amplitud alta para poder alcanzar la parte inferior de la capa por compactar. Si se utiliza otro tipo de rodillo, por ejemplo un rodillo liso o un rodillo pata de cabra, el número de pasadas variará, por lo que el número de pasadas depende del equipo utilizado.

El tipo de equipo a utilizar depende en gran medida de las características del material a compactar, a continuación se presentan algunos utilizados en la actualidad:

- Vibro compactador de cilindro simple.

Este tipo de rodillos se usan para la compactación de suelos arenosos, gravas, suelos cohesivos y semicohesivos, muchos proyectos de suelo-cemento se emprenden con este tipo de equipo, Fig. 2.32 (a).

El sistema que utiliza para la compactación del material es un motor vibratorio ubicado dentro del tambor. Este tipo de cilindros puede adaptarse fácilmente para la compactación, tanto de los suelos mencionados, como de carpetas asfálticas, teniendo en cuenta que para ésta, las llantas que se utilizan deben ser lisas, convirtiéndolo en un equipo de gran versatilidad en su uso.

En terrenos con pendientes menores al 7-8%, donde no se corre el peligro de deslizamientos del vibro compactador, es aconsejable utilizar el de llanta lisa para la compactación del suelo-cemento pues ayuda a sellar fisuras.



(a)

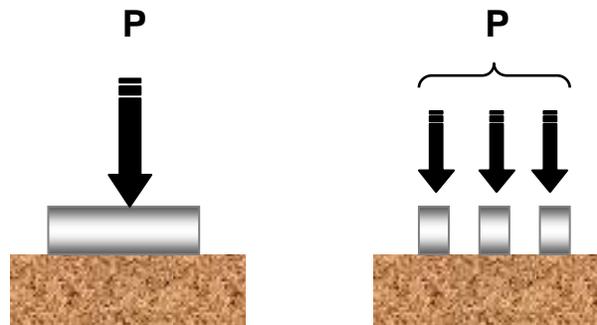


(b)

**Fig. 2.32 Maquinaria de compactación.**

- Compactador tipo pata de cabra (Conocido en campo como Chifú).

Este tipo de compactador es muy utilizado en suelos que no son fácilmente reacomodables con vibración, Fig. 2.32 (b). Es el caso de suelos cohesivos como las arcillas, donde se utiliza la presión como medio de compactación. El sistema empleado por este equipo es sumamente sencillo, la presión que el peso del compactador transmite al suelo, no es sobre todo el tambor, sino sobre los dientes Incrustados en él, así al reducir el área de contacto se aumenta la presión puntual. El efecto lo podemos ver más fácilmente en la Fig. 2.33.



**Fig. 2.33 Distribución de presiones de un rodo liso y un rodo tipo pata de cabra.**

$$\text{Presión 1} = P/A_1, \quad \text{Presión 2} = P/A_2, \quad A_1 > A_2, \quad \text{Entonces: Presión 2} > \text{Presión 1}$$

Las huellas dejadas por este equipo pueden ser removidas por la motoniveladora o se puede humectar un poco el material y pasar el vibro compactador.

- Compactador de rodillos tándem.

Es el resultado de una modificación del vibro compactador de rodillo sencillo. Cuenta con un rodillo vibratorio extra en la parte posterior para ganar eficiencia en el proceso, pues por cada pasada se obtiene, para pesos equivalentes, el doble de energía de compactación. La forma de densificar no es sustancialmente distinta a la del vibro compactador visto anteriormente.



**Fig. 2.34 Compactador de rodillos tándem.**

- Compactador neumático.

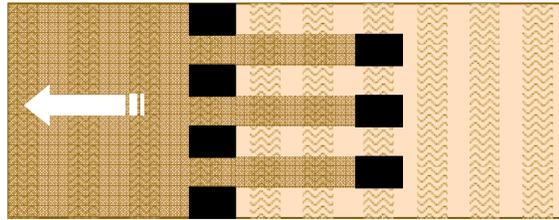
En la estabilización de suelos con cemento este tipo de equipo es usado para el sellado de fisuras y el acabado superficial, al igual que en las mezclas asfálticas convencionales.

Su funcionamiento se basa en dos conceptos fundamentales:

Reducción de la superficie de contacto, lo cual genera mayor presión y mejor eficiencia en la compactación.

El contacto del material se produce a través de las llantas lisas, lo cual permite el sellado superficial del material.

Para garantizar que toda el área sea cubierta en forma eficiente, el compactador cuenta con una doble línea de ruedas que poseen un desfase tal que las traseras cuadran en los espacios dejados por las delanteras, como puede observarse en la Fig. 2.35.



**Fig. 2.35 Compactador neumático.**

Un punto importante a tener en cuenta cuando se esté en el proceso de conformación y compactación, es el acabado superficial que se le dé a la mezcla de suelo-cemento. Si bien éste tiene que cumplir con las condiciones básicas de compactación y nivelación, también es importante que le sean removidos cualquier tipo de plano superficial de compactación, basuras, desperdicios o lodo que cause una falta de adherencia con las capas posteriores.

Es importante garantizar la adherencia entre las capas de suelo cemento, para que estas se comporten como una sola estructura, el ACI hace las siguientes recomendaciones:

1. Minimizar el tiempo de colocación entre capas sucesivas.
2. Usar cemento seco o lechada de cemento. El cemento seco debe de aplicarse a una razón aproximada de  $1 \text{ lb/yd}^2$  ( $0.55 \text{ Kg/m}^2$ ) en una superficie humedecida, inmediatamente previo a la colocación. Si se utiliza lechada de cemento, esta debe tener una proporción de cemento-agua de aproximadamente 0.70 a 0.80.

3. Después de colocado el suelo cemento, cepillar la superficie con una escoba o cepillo para proporcionar una textura áspera a la superficie.
4. Usando aditivos químicos.

#### **2.6.5. 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.

Una alternativa viable al problema de fisuración ha sido la formación de juntas, que ha tenido resultados satisfactorios en países como Francia, Austria y EUA, en general se conocen cuatro procedimientos para el control de contracciones:

- Prefisuración, se aplica compactación con rodo vibratorio 3 días posteriores a la finalización de la capa estabilizada, con el objetivo de crear una red de micro grietas capilares que reducirán las grietas generadas por contracción.
- Juntas, similares a las realizadas en losas de concreto hidráulico.
- Embebiendo material plástico, antes de la compactación para que una vez compactado genere discontinuidad en la capa con el objetivo de inducir grietas.
- Modificando el diseño de la mezcla, mejorando los requerimientos de diseño de mezcla, especialmente en el tipo de cemento utilizado y la energía de compactación aplicada

### 2.6.6. Curado.

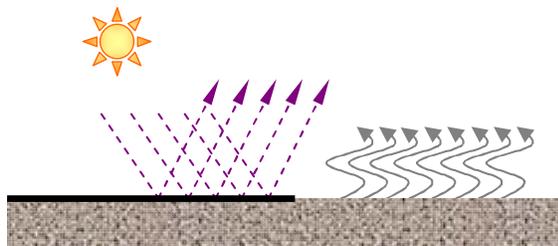
Como en todo proceso de curado de mezcla con cemento lo que se busca son condiciones buenas de fraguado. Aunque se afirma que el suelo-cemento estará continuamente aumentando su resistencia, se debe garantizar que gran porcentaje de ella se obtenga en edades tempranas.

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.

En general existen dos formas de lograr el curado de las capas de suelo cemento.

- Curado con material bituminoso o membranas.

Consiste en aplicar a la capa estabilizada una película que aíse el agua contenida en la mezcla de las condiciones atmosféricas para impedir que sea liberada por evaporación y el fraguado sea insuficiente. El curado usando material bituminoso, en el suelo cemento, normalmente se sella con una emulsión asfáltica. La proporción de aplicación depende de la emulsión en particular, pero típicamente varía de 0.15 a 0.30 Gal/yd<sup>2</sup> (0.7 a 1.4 Lt/m<sup>2</sup>), La Fig. 2.36 esquematiza el fenómeno.



**Fig. 2.36 Aislamiento con capa bituminosa.**

- Curado con agua.

Es tal vez el proceso más sencillo y consiste en devolverle al suelo estabilizado la cantidad de agua necesaria para que se produzca la reacción de la mayor parte del cemento. Se hace pasando un camión cisterna o carro tanque con agua una o dos veces por hora para humedecer constantemente el material estabilizado hasta que sea colocada la capa siguiente.

En este punto del proceso se sugiere poner lo más rápido posible las capas superiores porque el suelo-cemento es un material que responde muy bien a la compresión, pero pudiera sufrir cuando se somete a las cargas directas del tránsito. En caso de necesitar dar paso provisional de vehículos se recomienda cubrirlo con una capa pobre de arena para que sea ésta la que sufra el arrastre de los vehículos y no la capa de suelo-cemento.

### **2.6.7. 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<sup>18</sup> 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.

---

<sup>18</sup> Comité 230, El estado del arte del suelo cemento.

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.

A continuación se detallan algunos procedimientos propios para el control de los procesos constructivos de capas de suelo cemento:

### **Pulverización (Mezclado en el lugar).**

La mayoría de suelos requieren un mínimo de pulverización antes de iniciar el proceso. Sin embargo, los suelos arcillosos densos requieren una considerable cantidad de trabajo preliminar. La clave para la pulverización de suelos arcillosos es un control de humedad apropiado y maquinaria apropiada. Puesto que los suelos arcillosos no son recomendables para ser pulverizados adecuadamente en planta, su uso se restringe a ser mezclado en el lugar de construcción. Las especificaciones de la PCA requieren que en la realización de mezclas húmedas, el 80% de la mezcla de suelo cemento pase la malla No. 4 y el 100% pase la malla de 1 pulg. Esto se puede verificar haciendo una prueba de pulverización, que consiste en tamizar una muestra representativa de suelo cemento en la malla No. 4. Cualquier grava o roca retenida en la malla debe ser sacada y desechada. Los fragmentos de arcilla retenidos y el suelo pulverizado que pasa la malla No. 4 son pesados separadamente y se determinan sus pesos secos. El grado de pulverización es calculado como se muestra a continuación:

$$\text{Porcentaje de Pulverización} = \frac{\text{Peso seco de la mezcla de suelo cemento que pasa la malla No. 4}}{\text{Peso seco de la muestra total sin incluir la grava retenida en la malla No. 4}} \times 100$$

Note que para propósitos prácticos, se usan a menudo pesos húmedos de materiales en lugar de los pesos secos corregidos. Las medidas de peso húmedo son bastante exactas y permiten ajustes inmediatos durante el proceso de pulverización y mezclado si fuese necesario.

La pulverización puede mejorarse por:

- La disminución de la velocidad inicial de la maquina mezcladora.
- Pasadas adicionales de la maquina mezcladora.
- Reemplazando dientes del mezclador usados.
- Remojando y premezclando el suelo antes de iniciar el proceso.
- Agregando cal a suelos altamente plásticos para reducir plasticidad y mejorar la trabajabilidad.

El suelo que contiene excesiva humedad no se debe mezclar apresuradamente con cemento. El porcentaje de humedad en el suelo al aplicar el cemento debe ser o debe estar cercano al porcentaje de humedad óptimo. El exceso de humedad puede reducirse por medio de pulverización adicional y secado al aire, en casos extremos puede adicionarse cal.

## Control del Contenido de Cemento.

### Mezclado en el lugar.

Cuando el cemento es colocado utilizando propagadores de cemento. Es necesario verificar la precisión del distribuidor de cemento para garantizar que la cantidad apropiada realmente esta siendo aplicada. Cuando el volumen de cemento está siendo aplicado, el chequeo es hecho de dos formas:

- Chequeo del lugar.

Una hoja de lona, normalmente de 1 yd<sup>2</sup> de área, es colocada delante del propagador de cemento. Después de que el propagador ha pasado, la lona con cemento es levantada cuidadosamente y se pesa Fig. 2.37. Si es necesario el propagador es ajustado y el procedimiento se repite hasta que la cobertura por yd<sup>2</sup> correcta es obtenida.



Fig. 2.37 Pesado de cemento recogido en una lona de 1 yd<sup>2</sup> para verificar la cantidad de cemento esparcido.

- **Chequeo Global.**

Se mide la distancia o el área cubierta por un camión cargado de cemento de peso conocido. Entonces el área real se compara con el área teórica, que la cantidad conocida de cemento debió haber cubierto.

Generalmente, el propagador es primeramente ajustado al inicio de la construcción después de chequear el cemento extendido por  $\text{yd}^2$  con la lona. Entonces se hacen pequeños ajustes después de chequear la distancia cubierta por cada camión. Es importante seguir un chequeo continuo de la operación de extendido de cemento.

En algunos proyectos, a veces se usa cemento en bolsas. Las bolsas deben espaciarse a intervalos transversales y longitudinales aproximadamente iguales que garanticen el apropiado porcentaje de cemento. Las posiciones pueden ser señaladas con banderas o mojones sujetos a cordeles a intervalos adecuados para marcar filas transversales y longitudinales. Para verificar que la dosificación es correcta, solo basta comparar las separaciones entre bolsas y compararlas con las separaciones obtenidas en el cálculo previamente realizado (ver sección 2.6.3.1).

### **Mezclado en planta Central.**

En un procedimiento realizado en una planta de mezclado central, es necesario proporcionar el cemento y el suelo antes de que entren a la cámara de mezclado. Cuando el suelo cemento es mezclado en concretera o tambor rotatorio mezclado en planta, las cantidades adecuadas de suelo, cemento y agua para cada lote son pesadas antes de transferirse al mezclador. Estos tipos de plantas son calibradas simplemente verificando la exactitud de las pesas de las balanzas.

Para un flujo continuo de mezcla en planta, pueden usarse dos métodos de calibración.

- Con la operación en planta, la tierra corre a través de la planta por un periodo de tiempo dado y se recoge en un camión. Durante este mismo periodo, el cemento es desviado directamente del alimentador de cemento dentro de un camión o en un contenedor apropiado. Ambos, la tierra y el cemento, se pesan y el alimentador de cemento es ajustado hasta que es descargada la cantidad de cemento correcta.
- La planta se opera únicamente con tierra alimentada desde la banda transportadora principal. Se recoge tierra de una longitud seleccionada de la banda transportadora y se determina su peso seco. Entonces la planta se opera únicamente con cemento alimentado por la banda transportadora principal. El alimentador de cemento se ajusta hasta que la cantidad de cemento está descargándose.

Puede ser necesario calibrar la planta mezcladora a varias velocidades de operación. Normalmente, se calibran plantas diariamente al principio de un proyecto, y periódicamente después de esto, para asegurar que ningún cambio ha ocurrido en el funcionamiento.

### **Humedad.**

La humedad apropiada es necesaria para la adecuada compactación y para la hidratación del cemento. La humedad apropiada para los suelos tratados con cemento es determinada por el ensayo de Humedad-Densidad (ASTM D 558, D 1557 o AASHTO T-180, T-134). Esta humedad es conocida como humedad óptima, es usada como guía para el control de campo durante la construcción. El porcentaje de agua agregado al suelo es igual a la diferencia entre el contenido de humedad óptima y el contenido de humedad del suelo. Puede agregarse aproximadamente el 2% de humedad adicional para considerar la hidratación del cemento seco y por la evaporación que normalmente ocurre durante el proceso.

Un estimado del contenido de humedad de la mezcla de suelo cemento puede ser hecho por observación y apreciación. Una mezcla con la humedad óptima o cercana, es justo cuando la humedad es suficiente para humedecer las manos cuando es apretada firmemente. Mezclas sobre el óptimo requerido dejaran un exceso de agua en las manos, mientras que mezclas abajo del óptimo requerido tenderán a desmenuzarse fácilmente. Si la mezcla está cercana a la humedad óptima, el consolidado puede romperse en dos piezas con pequeños o ningún desmenuzamiento Fig. 2.38.



**Fig. 2.38 Verificación de la humedad previa a la compactación.**

Durante la compactación y la finalización, la superficie de la mezcla de suelo cemento puede ponerse seca, como evidencia de esto la superficie se pone gris. Cuando esto ocurre, se aplica ligeramente agua rociada para devolverle el contenido de humedad óptimo. El contenido de humedad apropiado del suelo cemento compactado es evidenciado por una superficie lisa, húmeda, firmemente unida, compacta libre de grietas y sin polvo.

### **Uniformidad de la mezcla.**

#### **Mezclado en el lugar.**

Una mezcla completa de suelo pulverizado, cemento y agua es necesaria para elaborar suelo cemento de alta calidad. La uniformidad de toda la mezcla de suelo

cemento puede verificarse cavando zanjas o con una serie de agujeros a intervalos regulares por toda la profundidad tratada y se verifica el color del material expuesto. Cuando la mezcla es de color y textura uniforme y similar a la superficie cuando se profundiza, la mezcla es satisfactoria. Una mezcla que tiene una apariencia rallada no ha sido mezclada suficientemente. La profundidad de la mezcla es usualmente revisada, al mismo tiempo que su uniformidad. Frecuentemente se realizan chequeos de profundidad durante el proceso de mezclado y en las siguientes compactaciones, para asegurar que se logren los espesores especificados. En las compactaciones se puede realizar un chequeo final sobre la uniformidad de la mezcla y la profundidad, según el ACI 230 puede usarse una solución al 2% de fenolftaleína.

La solución de fenolftaleína puede colocarse sobre la cara fresca de un corte de suelo cemento recién compactado. El suelo cemento se pondrá rosa-rojizo mientras que el suelo sin tratar y el material de la subrasante retendrá su color natural (a menos que sea tierra rica en calcio).

### **Mezclado en planta.**

Para el mezclado en planta de suelo cemento, normalmente la uniformidad es chequeada visualmente en la planta mezcladora. También puede verificarse en el área de colocación de forma similar al método utilizado para la elaboración de mezcla en el lugar. El tiempo de mezcla necesario para lograr una mezcla íntimamente uniforme dependerá de la granulometría del suelo y de la planta mezcladora usada. Normalmente son requeridos de 20 a 30 segundos de mezclado.

### **Compactación.**

La mezcla de suelo cemento es compactada con o cerca del contenido de humedad óptima, usualmente se especifica el mínimo porcentaje de densidad máxima. Generalmente, el rango de densidad requerida es de 95 y 100 por ciento de la máxima

densidad del suelo cemento determinado en el ensayo humedad-densidad (ASTM D 558, D 1557 o AASHTO T-180, T-134). Los métodos más comunes para determinar la densidad en campo son:

1. Método Nuclear (ASTM D 2922 y D 3017, AASHTO T-238).
2. Método del cono de arena (ASTM D 1556, AASHTO T- 191).
3. Método del Globo (ASTM D 2167, AASHTO T- 205).

La densidad en campo es determinada periódicamente con una frecuencia altamente variable, dependiendo de las solicitudes de la supervisión o de las especificaciones técnicas. El ensayo es realizado inmediatamente después del compactado. Comparando las densidades del lugar con los resultados de densidad máxima, los resultados del ensayo de humedad-densidad de campo indican cualquier ajuste en los procedimientos de compactación que pueden ser requeridos para garantizar la conformidad con las especificaciones de la obra.



**Fig. 2.39** Equipo utilizado para control de densidad en campo.

En el país generalmente se usa el método del cono de arena o en su defecto el método nuclear, a continuación se hace una breve descripción de estos métodos:

- Método del cono de arena.

Para este ensayo de campo se utiliza un equipo que consiste de un aparato de cono de arena, que consta de un frasco de aproximadamente un galón (3.785 litros), una válvula cilíndrica con un orificio de 1/2' de diámetro provista de un embudo que continúa hasta la tapa del frasco.



**Fig. 2.40** Equipo utilizado en el método del cono de arena.

Arena: debe ser limpia, seca, uniforme, no cementada, durable y preferiblemente redondeada para que fluya libremente.

Deberá tener un coeficiente de uniformidad (D<sub>60</sub>/D<sub>10</sub>) menor que 2 y no contener partículas que queden retenidas en el tamiz de 2mm (N° 10), así como estar desprovista de partículas de arena fina (menor que 250 mm, No 60), para prevenir segregación en almacenamiento o variaciones de peso unitario como consecuencia de cambios en la humedad atmosférica.

Balanzas: para el ensayo se requiere una balanza de capacidad 10 Kg y sensibilidad de 2g y otra de capacidad 200g y sensibilidad de 0,1 g.

Equipo para el secado: estufa, horno u otro equipo que permitan sacar el agua de la mezcla.

En general el ensayo requiere de algunos elementos menores que ayuden al proceso para su correcta ejecución.

Procedimiento de ensayo: antes de la determinación del peso unitario del suelo en el sitio se deben conocer: el volumen del frasco y del conjunto, el peso unitario aparente de la arena y el peso de la arena necesaria para llenar el embudo. Para determinar el peso unitario del suelo se deben seguir los siguientes pasos:

- Preparar el sitio de ensayo dejando un nivel plano.
- Marcar el límite del contorno del embudo, poniendo el aparato invertido para identificar el punto por excavar.
- Excavar teniendo cuidado con alterar el suelo que limita el hueco.
- Extraer el suelo suelto, teniendo en cuenta evitar pérdidas de material.
- Poner el aparato en posición en el sitio previamente marcado, dejar fluir la arena y cerrar la válvula cuando ésta haya dejado de fluir.
- Determinar el peso de la arena utilizada en el ensayo, pesando el aparato con la arena restante y determinando su diferencia.
- Pesar el material removido del sitio del ensayo.
- Mezclar debidamente la muestra y determinar su humedad.
- Finalmente con esta información tenemos, tanto el peso del material desplazado, como el volumen del sitio que lo contenía. Así podemos determinar el peso unitario del material requerido.

- **Método nuclear.**

Equipo utilizado: se le conoce con el nombre de densímetro nuclear y consta básicamente de tres elementos:

- Fuente nuclear emisora de rayos gama.
- Detector sensible a los rayos gama.
- Cronómetro automático y preciso.

Su funcionamiento consiste en la emisión de rayos a partir de la fuente para luego ser captados por el detector, el cual, con ayuda del cronómetro, determina la razón a la que los rayos gama modificados llegan de vuelta.



**Fig. 2.41 Densímetro Nuclear.**

Procedimiento de ensayo: para el ensayo existen tres métodos distintos:

- Método A - Retrodispersión.
- Método B - Transmisión directa.
- Método C - Colchón de aire.

Sólo será necesaria la explicación detallada de uno de ellos, ya que los otros dos se harán utilizando el mismo equipo en forma similar.

El método más común es la transmisión directa ya que nos permite medir la densidad en capas entre 50 y 300 mm. (2' y 12').

Este ensayo se lleva a cabo de la siguiente forma:

- Escoger un sitio donde el medidor quede en posición para el ensayo, mínimo a 150 mm. (6") de cualquier proyección vertical.
- Remover todo el material suelto, alterado o adicional que sea necesario para exponer la parte superficial de la capa por ensayar.

- Preparar un área horizontal con suficiente tamaño para acomodar el medidor, de tal forma que se obtenga el máximo contacto entre el medidor y el material a ser estabilizado.
- Excavar un orificio por lo menos 50 mm. (2') mayor que la profundidad a la cual será puesta la sonda. Este orificio debe ser perpendicular a la superficie preparada.
- Poner el medidor en la superficie, insertar la sonda a la posición requerida y ajustar bien el sistema al sitio del ensayo.
- Mantener fuera del medidor cualquier otra fuente radiactiva que pueda influir en la medición.
- Finalmente, con la ayuda del equipo, se obtienen las lecturas requeridas de acuerdo con la curva de calibración.

Es necesario alcanzar el porcentaje de compactación requerido, ya que de ello depende directamente la resistencia a la compresión, que es una de las propiedades más importantes en la capa de suelo cemento que forma parte de la estructura de un pavimento. Para verificar que el requerimiento de resistencia a la compresión se cumpla, es necesario realizar ensayos que nos muestren el comportamiento de la mezcla de suelo cemento ante cargas de compresión. A continuación se describe el ensayo a la compresión simple.

- **Ensayo a la compresión simple:**

El equipo utilizado podrá ser de cualquier tipo que tenga la capacidad suficiente y el adecuado control para suministrar la razón de carga necesaria en el proceso, Fig. 2.42.

El equipo deberá estar provisto de dos superficies de apoyo de acero templado, una de las cuales es conformada por un bloque de levantamiento asentado

esféricamente, el cual normalmente se apoya en la superficie superior de la muestra. El ensayo utilizará los moldes de compactación usados en el diseño.



**Fig. 2.42** Maquina utilizada en el ensayo de compresión simple.

Procedimiento de ensayo:

- Preparar las muestras según lo indica la norma ASTM D 1632 y D 1633, ya sea por el método A, espécimen de 4' o por el método B, especímenes de 2.8' de diámetro. Aunque el método A es más práctico por que permite utilizar el equipo del ensayo próctor, es sabido que el método B es más preciso, pues reduce el efecto del complejo sistema de esfuerzos que pueden presentarse durante la utilización del método A debido a que no se cumple la relación de 2 a 1 de altura y diámetro.
- Curar las probetas en los moldes en cámara húmeda por doce horas. Esto permitirá la extracción de la muestra, la cual debe ser devuelta inmediatamente a la cámara húmeda hasta el momento de su fallado.

- Al final del período húmedo y antes de proceder al fallado de la muestra, se debe sumergir en agua por cuatro horas.
- Extraer el agua y efectuar lo más pronto posible la compresión, intentando que la muestra se mantenga húmeda.

Una vez sea determinada la resistencia a la compresión inconfiada de las muestras, estos resultados deben ser comparados con los mínimos requeridos en las especificaciones del proyecto.

### **Espesor y tolerancia geométrica de la superficie.**

#### **Espesor.**

Es usual chequearlo cuando se realiza el chequeo de la densidad de campo con el cono de arena, o excavando pequeños agujeros en el suelo cemento fresco para determinar el fondo de la capa colocada. Los espesores también pueden ser chequeados extrayendo núcleos de suelo cemento endurecido. Esto proporciona un núcleo de diámetro pequeño para medir el espesor y si fuese requerido, para el ensayo de resistencia a la compresión. El espesor de capa es usualmente más crítico para pavimentos que para terraplenes. Para pavimentos, el cuerpo de ingenieros de la armada de Estados Unidos normalmente ensaya espesores con núcleos de 3 pulg. (7.6 cm) de diámetro por cada 500 yd<sup>2</sup> (414 m<sup>2</sup>) de suelo cemento. Otras agencias, como Caltrans, requieren que las medidas de espesor sean tomadas a intervalos que no excedan 1000 pies (305 m) lineales.

#### **Tolerancia superficial.**

La tolerancia de la superficie normalmente no es especificada cuando se utiliza suelo cemento en rellenos compactados, El U.S. Bureau exige controles únicamente en crestas de rellenos compactados de caminos de suelo cemento y permite un rango de tolerancia de 0.01 pies (3 mm) de la especificación de diseño.

Para proveer una superficie razonablemente lisa en secciones de pavimentos, la uniformidad es usualmente medida con un codal de 10 pies (3 m) o 12 pies (3.65 m). El cuerpo de ingenieros de la armada de Estados Unidos normalmente requiere que la desviación del plano de la base de suelo cemento no exceda 3/8 de pulg. en 12 pies usando una regla niveladora (codal) colocado perpendicularmente a la línea central a intervalos aproximadamente de 50 pies (15.25 m). La mayoría de departamentos de transporte limitan una desviación máxima utilizando un codal de 12 o 10 pies, de 3/8 (9.6 mm) de pulg. Además, es normalmente permitida una desviación de la especificación de diseño de 5/8 (16 mm) de pulg. de sobre alto.

Adicionalmente a los criterios propuestos por el ACI, diferentes instituciones u organismos realizan sus propias normas o especificaciones técnicas para el control y supervisión de los procesos constructivos de las bases y subbases de suelo cemento, para ser aplicadas en sus respectivos países. Algunos utilizan otros criterios de supervisión, pero en esencia son similares entre sí.

### **Curado.**

El control de calidad en la fase de curado, consiste básicamente en verificar que su ejecución sea realizada acorde a uno de los métodos planteados en las especificaciones, y en garantizar que el tiempo destinado a esta actividad sea el necesario.

## CAPITULO 3: DISEÑO DE PRUEBA.

### 3.1 Materiales a utilizar en la elaboración de mezclas de prueba.

Para la elaboración de los especímenes de prueba se utilizó suelo proveniente de la formación Ilopango, el banco se encuentra ubicado sobre la carretera que de Soyapango conduce a San Martín a la altura del kilómetro 4 ½ . El cual, por la zona donde fue muestreado (ver fig. 3.1) y de acuerdo con una inspección visual manual, se supuso que era un suelo areno limoso característico de los bancos que se encuentran en los alrededores de Lago de Ilopango, lo cual posteriormente se comprobó con la realización de una clasificación del suelo con propósitos de ingeniería. Según el mapa geológico de el Salvador es un depósito de piroclastitas acidas.

El cemento a utilizar, como ya fue mencionado, se divide en dos tipos, el cemento ASTM C-91 tipo M y el ASTM C-1157 tipo HE; y el agua que se utilizó fue agua potable obtenida de la red pública.

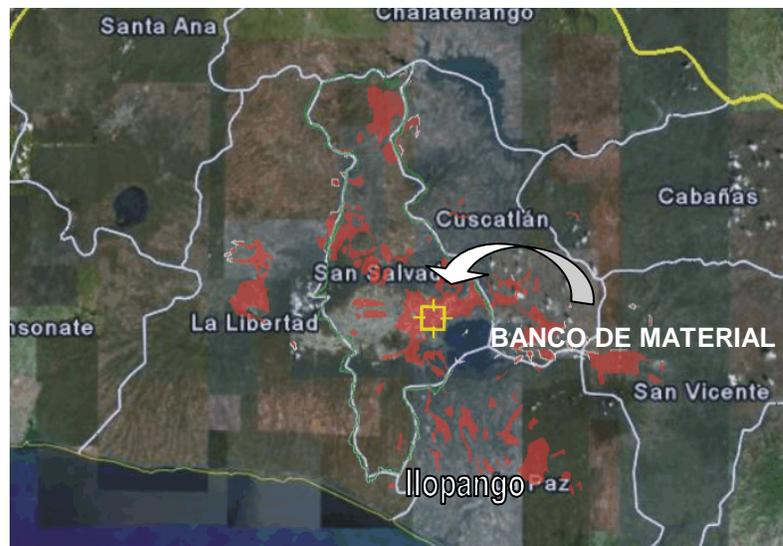


Fig. 3. 1. Mapa de la zona donde se ubica el banco de material del cual fue extraído el suelo utilizado para la realización de los ensayos.

### 3.1.1 Clasificación de suelo para propósitos de ingeniería.

#### 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. 3.2. y tabla 3.1 y en la tabla 3.2 de la guía AASHTO.

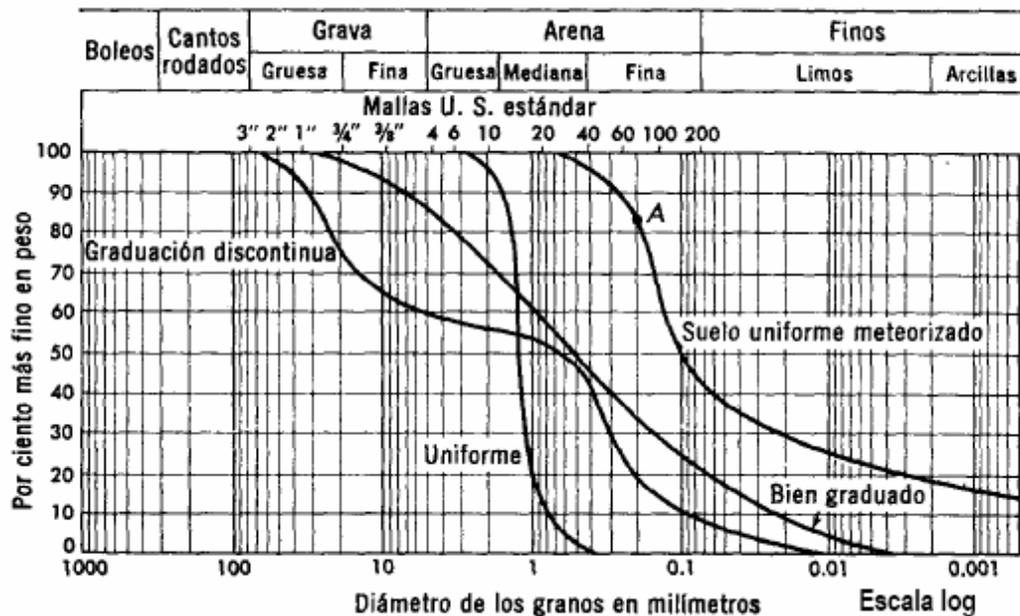


Fig. 3. 2. Representación gráfica del tamaño de las partículas de un suelo.  
Fuente: Introducción a la Mecánica de suelos y cimentaciones (Sowers and Sowers).

Principales Divisiones		Símbolo de Grupo	Nombre Típico	Criterio de Clasificación		
Suelos de grano grueso más del 50% retenido en el tamiz N. 200	Gravas gruesas con mas del 50% de la fracción retenida en el tamiz No. 4	Gravas limpias	GW	Bien graduados, grava y mezcla de grava arenosa con poco o nada de finos	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \text{ Mayor que } 4$ $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \text{ Entre } 1 \text{ y } 3$	
			GP	Mal graduado, grava y mezcla de grava arenosa con poco o nada de finos		
		Gravas con finos	GM	Limo gravoso, mezcla de grava arenosa limosa		Límites de Atterberg por debajo de la línea "A" o un índice de plasticidad menor que 4. Límites de Atterberg por arriba de la línea "A" o un índice de plasticidad menor que 7.
			GC	Arcilla gravosa, mezcla de grava arena y arcilla		
	Arenas gruesas con mas del 50% de la fracción pasando la malla No. 4	Arenas limpias	SW	Arena bien graduada, y arena gravosa con poco o nada de finos	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \text{ Mayor que } 6$ $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \text{ Entre } 1 \text{ y } 3$	
			SP	Arena mal graduada, y arena gravosa con poco o nada de finos		
		Arenas con finos	SM	Arena limosa, limos arenosos		Límites de Atterberg por debajo de la línea "A" o un índice de plasticidad menor que 4 Límites de Atterberg por arriba de la línea "A" y un índice de plasticidad mayor que 7
			SC	Arena arcillosa, arcilla arenosa		
	Suelos de grano fino con mas del 50% pasando el tamiz No 200	Sedimentos y arcilla con limite liquido menor del 50%	ML	Sedimentos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, limos o arcillas y arena fina	Clasificación sobre la base del porcentaje de las finos Menos del 5% pasa la malla # 200 Mas del 12% pasa la malla # 200 Del 5% al 12% pasa la malla # 200	
			CL	Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcilla magra, arcilla limosa		
			OL	Limos orgánicos y limos arcillosos orgánicos de baja plasticidad		
		Sedimentos y arcilla con limite liquido superior al 50%	MH	Limos inorgánicos micáceos o diatomáceos, arenas finas o limos, limos elásticos		
CH			Arcillas inorgánicas de alta plasticidad			
OH			Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad			
Suelos altamente orgánicos	PT	Turba, fango y otros suelos altamente orgánicos	Límite de clasificación que requieren el uso de doble símbolos			

**Tabla 3. 1. Clasificación de suelos según ASTM.**  
**Fuente: Norma ASTM D 2487.**

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

**Tabla 3. 1. Clasificación de suelos según AASHTO.**  
Fuente: Norma AASHTO M 145.

### **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 llevo 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. 3.3).



**Fig. 3. 3. 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 pasó la malla N° 10 (fig 3.4) y para los tamaños arriba de la malla N. 10 se realizó tamizando el suelo manualmente (fig 3.5) 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:

Tamaño máximo nominal de las partículas. Pulg. (mm.)	Masa mínima aproximada de la porción de suelo (gr.)
3/8 (9.5)	500
3/4 (19.0)	1000
1 (25.4)	2000
1 1/2 (38.1)	3000
2 (50.8)	4000
3 (76.2)	5000

**Tabla 3. 2. Masa mínima a utilizar en el análisis de material retenido en la malla No 10.**  
Fuente: Norma ASTM D 422-63.

El suelo utilizado presento las siguientes características:

**Tamaño máximo:  $TM = 3/4$ .**

**Tamaño máximo nominal:  $TMN = 3/8$ .**

Basados en la tabla anterior, se utilizaron para el análisis granulométrico 776.43 gr. de suelo.

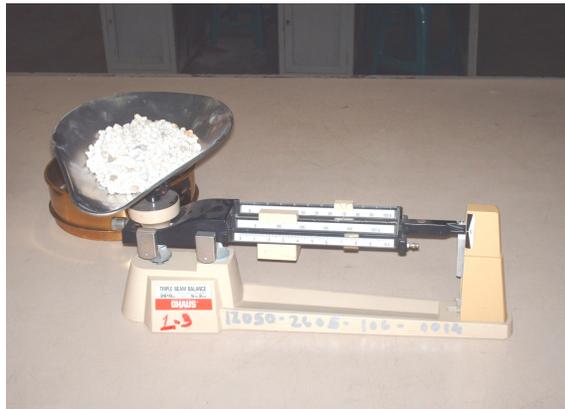


**Fig. 3. 4. Tamizado mecánico del suelo.**



**Fig. 3. 5. Tamizado manual del suelo.**

Después se peso el suelo retenido en cada malla teniendo mucho cuidado de evitar pérdidas de material (fig. 3.6), posteriormente, se calculo el porcentaje retenido en cada malla con respecto al peso total de la muestra y el porcentaje que pasa respecto a dicho total.



**Fig. 3. 6. Pesado de material retenido en las mallas.**

Por último, se gráfico el porcentaje de material que paso, en peso, y el diámetro de la malla Fig. 3.7, una vez graficados los resultados, obtuvimos la llamada Curva de Distribución Granulométrica.

A continuación se presentan en la tabla 3.3 los resultados que se obtuvieron mediante el ensayo granulométrico del suelo a utilizar:

Malla No.	Abertura (mm)	% que pasa
3/4	19,0	99,77
1/2	12,7	98,14
3/8	9,5	96,51
4	4,75	94,35
10	2,0	76,36
20	0,850	64,68
40	0,425	52,38
100	0,150	36,90
200	0,075	30,61

Tabla 3. 3. Tabla Resumen de Granulometría.

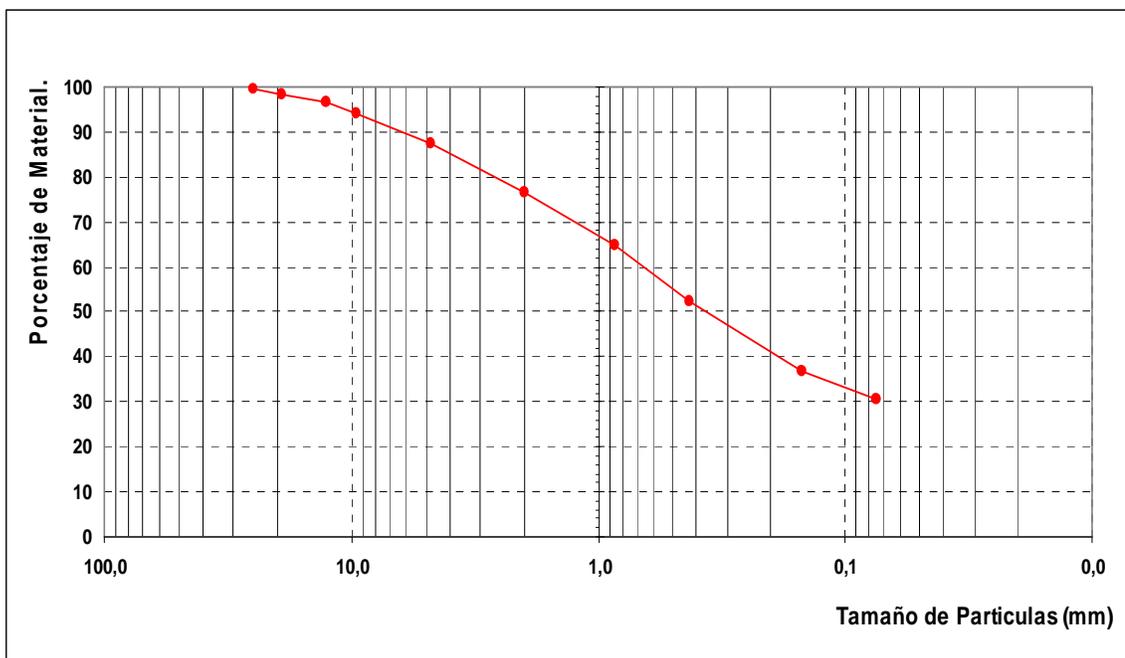


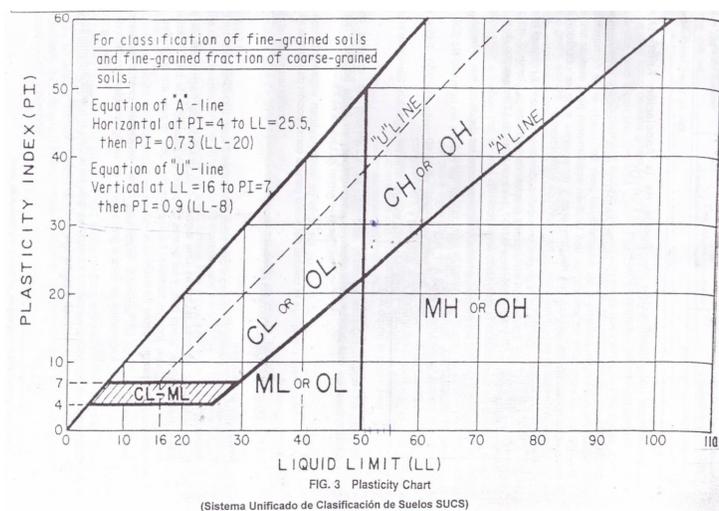
Fig. 3. 7. Curva granulométrica del suelo utilizado.

## 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 3.8).



**Fig. 3. 8. Carta de plasticidad.**

**Nota: Los límites de Atterberg que se grafican en el área sombreada son clasificaciones de frontera y requieren el uso de símbolos duales.**

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 170 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 amasó 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. 3.9 y 3.10).



**Fig. 3. 9. Colocación de la muestra en la Copa de Casagrande.**



a. vista en planta



b. vista frontal

**Fig. 3. 10. 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. 3.11, 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.



**Fig. 3. 11. Utilización de ranurador ASTM.**

### **Limite Plástico.**

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

Se tomo una porción de suelo de 20 gr. del mismo material que se utilizo para la determinación del limite se adiciono agua hasta formar una pasta, se coloco sobre un vidrio y se rodo hasta formar un cilindro de aproximadamente 3mm de diámetro en un tiempo no superior de 2 minutos, debido a que se fragmento el cilindro prematuramente se repitió el procedimiento varias veces.

### **Resultados.**

*El límite líquido no pudo ser determinado, ya que el numero de golpes en las pruebas nunca estuvo dentro de los intervalos necesarios para poder determinar dicho límite; en lo que respecta al limite plástico tampoco fue posible realizar cilindros del diámetro adecuado (aproximadamente 3 mm.) por lo que de acuerdo a los resultados obtenidos y a la norma ASTM D 4318-00 EL SUELO ES REPORTADO COMO NP (no plástico).*

Con la granulometría del suelo y con el resultado de los límites de consistencia se determino la clasificación del suelo de acuerdo a AASHTO Y ASTM concluyendo que el suelo utilizado es un **A-2-4** o una **ARENA LIMOSA** (SM por sus siglas en ingles) respectivamente. Para la clasificación AASHTO no pudo ser determinado el índice de grupo, para ello son necesarios el índice de plasticidad y el límite líquido que no pudieron determinarse por tener un suelo NP.

Tanto el análisis granulométrico como los resultados de los limites de Atterberg fueron comparados con especificaciones propuestas por algunas de las diferentes instituciones, especificaciones que se presentan en las tablas 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5 del capitulo anterior.

### **3.1.2 Características del Cemento a utilizar.**

En general los dos tipos de cementos utilizados en esta investigación son fabricados a partir del Clinker Pórtland. Para la elaboración del clinker se emplean materias primas capaces de aportar principalmente cal y sílice, y accesoriamente óxido de hierro y alúmina, para lo cual se seleccionan materiales calizos y arcillosos de composición adecuada. Estos materiales se trituran, dosifican, muelen y mezclan íntimamente hasta su completa homogeneización, ya sea en seco o en húmedo. La materia prima así procesada, se introduce en hornos rotatorios donde se calcina a temperaturas del orden de 1400 °C, hasta que alcanza un estado de fusión incipiente. En este estado se producen las reacciones químicas requeridas y el material se subdivide y aglutina en fragmentos no mayores a 6 cm, cuya forma se regulariza por efecto de la rotación del horno. A este material fragmentado, resultante de la calcinación, se le denomina clinker.

Una vez frío, el clinker se muele conjuntamente con una reducida proporción de yeso, que tiene la función de regular el tiempo de fraguado, y con ello se obtiene el polvo fino de color gris que se conoce como cemento portland simple. Además durante, la molienda, el clinker puede combinarse con una escoria o un material puzolánico para producir un cemento mezclado portland-escoria o portland-puzolana, o bien puede molerse con determinados materiales de carácter sulfo-calcio-aluminoso para obtener los llamados cementos expansivos.

También es factible incorporar aditivos durante la molienda del clinker, siendo de uso frecuente los auxiliares de molienda y los inclusores de aire.

#### **Cemento ASTM C-1157-02 tipo HE.**

El cemento elaborado bajo la norma ASTM C-1157 tipo HE (fig. 3.12) es un cemento hidráulico que se define por desempeño, este posee la misma composición

química del cemento ASTM C-150 tipo I, pero con la adición de puzolana y filler en proporciones específicas en la molienda final con la finalidad de darle las características deseadas. Con este cemento se obtienen altas resistencias iniciales; este cemento es principalmente adecuado para la estabilización de suelos, la construcción de pavimentos de concreto y bases granulares.



**Fig. 3. 12 Cemento ASTM C-1157 tipo HE utilizado en la investigación.**

### **Cemento ASTM C-91-03 tipo M.**

El cemento elaborado bajo la norma ASTM C-91 tipo M (fig. 3.13) tiene, en su fabricación, la peculiaridad de que en la molienda final se añade caliza y una resina plastificante inclusora de aire. El agente plastificante inclusor de aire genera microburbujas que actúan como lubricantes entre partículas y esto produce mezclas más trabajables.

Debido a su composición las mezclas elaboradas con este tipo de cemento, una vez endurecidas, sufren menos contracciones. Dos características importantes de este cemento son su plasticidad y su capacidad para retener el agua de mezclado; estas características suelen fomentarse con el uso de materiales inertes tales como caliza y arcilla, que pueden molerse conjuntamente con el clinker o molerse por separado y mezclarse con el cemento portland ya elaborado.



**Fig. 3. 13 Cemento ASTM C-91 tipo M utilizado en la investigación.**

### **3.1.3 Agua.**

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.

## **3.2. Compactación de acuerdo a norma AASHTO T-180 - 01.**

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. Esta práctica proporciona resultados satisfactorios y es permitida por el Manual Centroamericano de especificaciones para la construcción de carreteras y puentes regionales (SIECA).<sup>19</sup>

### **3.3. Elaboración de especímenes de prueba.**

Para el desarrollo de la investigación, se utilizarán especímenes cilíndricos de suelo cemento compactado, a los cuales se les determinará el módulo de elasticidad dinámico por medio de un equipo de pulso ultrasónico (ensayo no destructivo) y la resistencia a la compresión por medio del ensayo de compresión simple de cilindros de suelo cemento (sección 3.5 y 3.6).

---

<sup>19</sup> Manual Centroamericano de especificaciones para la construcción de carreteras y puentes regionales. CA-2001, COMITRAN-SIECA, sección 302.03.

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. Para ello y en coherencia a lo expuesto en el numeral anterior, se procederá según la norma AASHTO T 180.

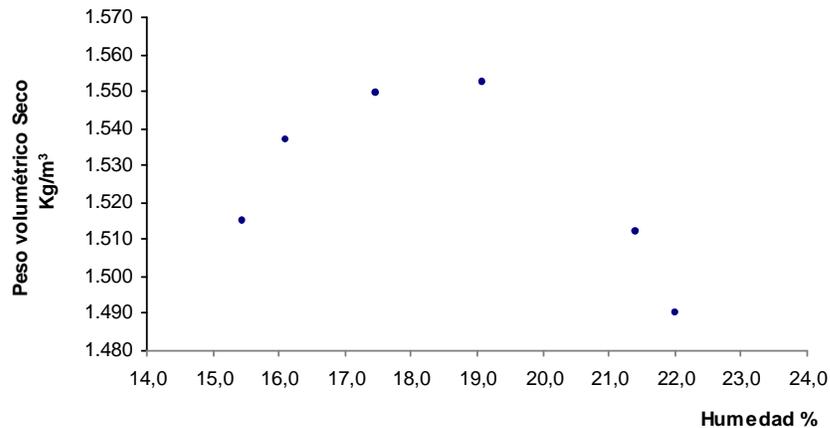
Como primer paso, se realizará el ensayo proctor al suelo a utilizar en la mezcla para obtener un valor estimado de humedad óptima y densidad máxima, que se espera que para las mezclas de suelo cemento dichos parámetros no varíen significativamente por las mínimas cantidades de cemento contenido en las 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 los especímenes de suelo cemento posean el mayor peso volumétrico seco posible.

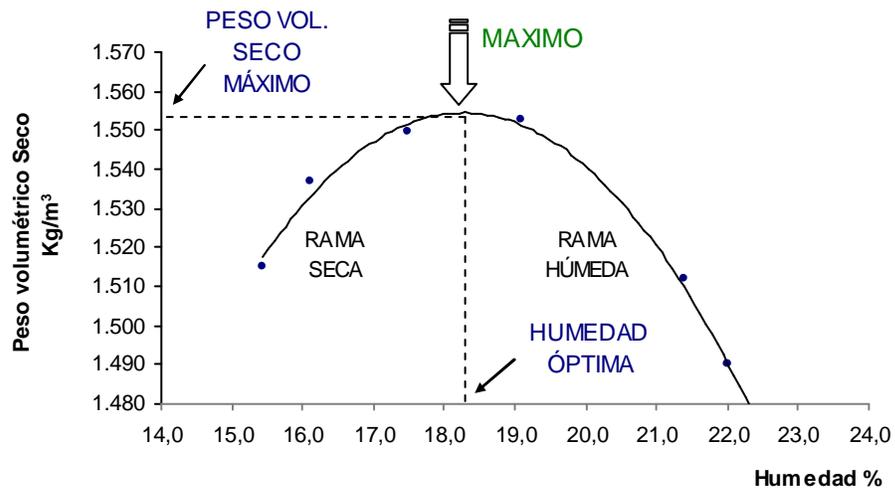
### **3.3.1 Realización de ensayo próctor al suelo a utilizar.**

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 especímenes 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. 3.14), 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. 3.15), que en otras palabras es la humedad necesaria en el suelo para poder alcanzar el máximo grado de compactación.



**Fig. 3. 14. Diagrama de dispersión Relación Humedad-Densidad.**



**Fig. 3. 15. Curva de compactación.**

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:

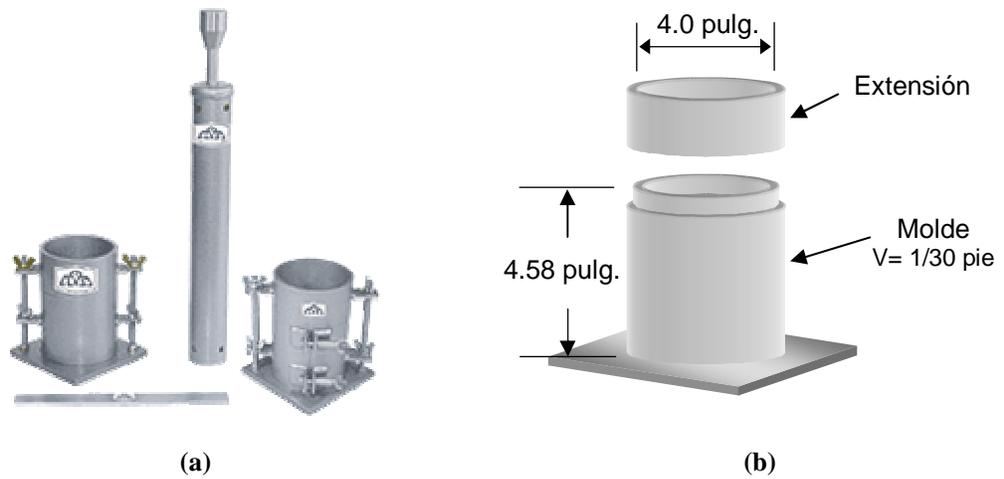
<b>Especificación</b>	<b>Método A</b>	<b>Método B</b>	<b>Método C</b>	<b>Método D</b>
Malla que pasa el material	4	4	3/4	3/4
Porcentaje máximo Retenido en malla.	40 %		30 %	
Diámetro del molde (pulg.)	4	6	4	6
No. De capas	5	5	5	5
No. De golpes por capa	25	56	25	56
Volumen del molde (pie <sup>3</sup>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

**Tabla 3. 4. Procedimientos alternativos para realizar el ensayo Proctor.**  
Fuente: Norma AASHTO T 180.

De la tabla anterior se puede concluir que en base a las características granulométricas del material (ver tabla 3.5), el método a utilizar es el método A, el cual utiliza un molde de 4" de diámetro, un volumen de 1/30 pie<sup>3</sup> (fig. 3.16) y proporciona una energía de compactación de 56,000 Lbs-pie/pie<sup>3</sup> (2,700 kN.m/m<sup>3</sup>) realizando cilindros elaborados en 5 capas, cada una de ellas compactadas con 25 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 A de la norma ASTM D 1633-96 (sección 3.3.3).

<b>Malla No.</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>% que pasa</b>
3/4	19,0	99.77
1/2	12,7	98.14
3/8	9,5	96.51
4	4,75	94.35
10	2,0	76,36
20	0,850	64,68
40	0,425	52,38
100	0,150	36,90
200	0,075	30,61

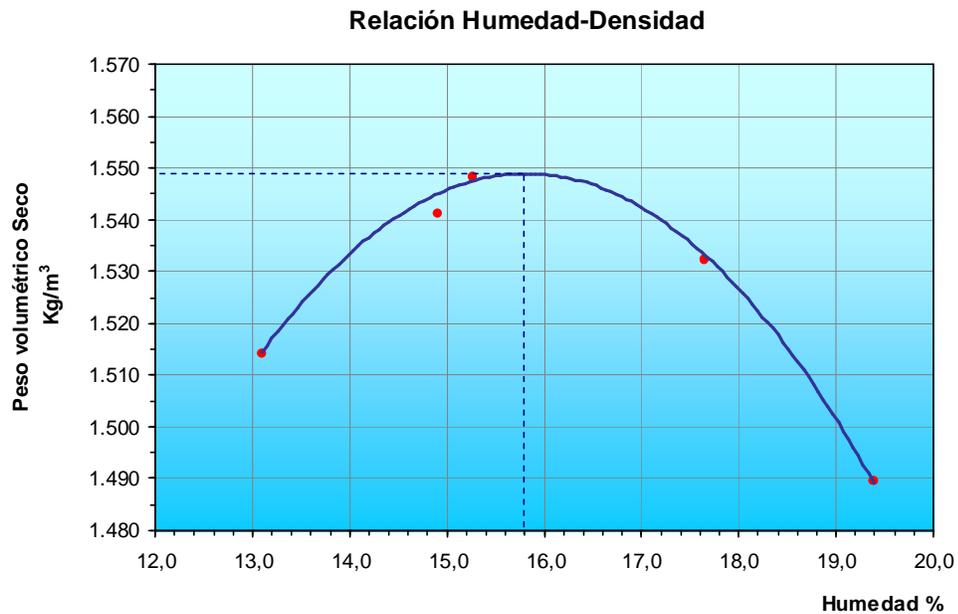
**Tabla 3. 5. Tabla Resumen de Granulometría.**



**Fig. 3. 16. (a) Moldes y martillo utilizado en el ensayo Proctor. (b) Dimensiones de molde utilizado en método A y C del ensayo proctor.**

Según la norma si se tiene mas del 5% en masa de partículas de sobretamaños (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 limosa utilizada en la investigación se tiene la siguiente relación de humedad-densidad, mostrada en la fig. 3.17



**Fig. 3. 17. Curva de compactación para la arena limosa utilizada en la investigación.**

De la curva de compactación se obtiene que el peso volumétrico seco máximo es de **1550 Kg/m<sup>3</sup>** y la humedad óptima de **15.8 %**.

### **3.3.2 Realización de ensayo próctor para determinar humedades óptimas en las mezclas de suelo cemento para los diferentes proporcionamientos.**

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 los dos tipos de cemento y los diferentes porcentajes de cemento en peso se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.6.

CEMENTO ASTM C-91 tipo M.			CEMENTO ASTM C-1157 tipo HE.		
porcentaje de cemento	Humedad Óptima (%)	densidad máxima (Kg/m <sup>3</sup> )	porcentaje de cemento	Humedad Óptima (%)	Densidad máxima (Kg/m <sup>3</sup> )
2	16,6	1563	2	15,9	1554
4	15,9	1578	4	15,7	1583
6	15,8	1585	6	15,3	1599
8	15,8	1588	8	15,2	1600

Tabla 3. 6. Resultados del ensayo Proctor para las diferentes mezclas de suelo cemento.

### 3.3.3 Elaboración de especímenes de prueba para los diferentes proporcionamientos de suelo cemento a investigar.

La elaboración de los especímenes se hará acorde a la norma ASTM D 1632-96, la cual comprende el procedimiento de elaboración y curado de especímenes 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.<sup>20</sup>*

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 4.0 pulg. (101.6 mm)

<sup>20</sup> Norma ASTM D 1632, sección 8.

de diámetro y de 4.584 pulg. (116.4 mm) de altura (Método A, sección 1.2.1 de la norma). Este método está restringido para materiales que retienen el 30% o menos de partículas en el tamiz  $\frac{3}{4}$  (19.0 mm), requisito que es cumplido por el material a utilizar para la investigación, por lo que los especímenes serán realizados 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 (56000Lb-pie/pie<sup>3</sup>), 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 los especímenes es el mismo utilizado para la realización del ensayo proctor. El procedimiento para la elaboración de los especímenes 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 los especímenes 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. 4, y se debe preparar una cantidad mínima de 3 Kg. (según ASTM D 558) para cada espécimen, se recomienda almacenar el material en bolsas plásticas para evitar la pérdida de humedad, ver fig. 3.18.



**Fig. 3. 18. 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 especifica 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. Ver fig. 3.19.



**Fig. 3. 19. Pesado de cemento en balanza de 0.01 gr. De precisión.**

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:

$$\text{Agua a agregar} = (W_s + W_c) \frac{(w_2 - w_1)}{(1 + w_1)}$$

Donde:

$(W_s + W_c)$  = 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, ver fig. 3.20, esta debe ser elaborada en un recipiente limpio, no absorbente y húmedo, en una charola de metal o en un tablero de acero.



**Fig. 3. 20. Elaboración manual de la mezcla de suelo cemento.**

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. 3.21a. Una vez elaborada la mezcla debe

de protegerse con una franela húmeda para evitar la pérdida de humedad ver fig. 3.21b. 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.



**Fig. 3. 21. (a) Adición de agua a la mezcla de suelo cemento. (b) Mezcla de suelo cemento protegida de la pérdida de humedad.**

### **Compactación del cilindro.**

Para la compactación de los cilindros se utiliza el equipo utilizado en el ensayo proctor según AASHTO T 180, método A o C: molde de 4” de diámetro y 4.58” de altura, con su respectiva extensión, 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 25 golpes (con el martillo de 10 lb y 18” de altura de caída). Ver fig. 3.22.



**Fig. 3. 22. Elaboración de Especímenes 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. Ver fig. 3.23a.

La última capa no debe sobrepasar más de 1cm la altura del molde, sobre altura que posteriormente debe ser retirada utilizando la regla enrazadora fig. 3.23b.



(a)



(b)

**Fig. 3. 23. (a) Escarificado de capa compactada, (b) Enrazado de espécimen.**

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 del espécimen) y enrazarlo nuevamente. Ver fig. 3.24.



**Fig. 3. 24. Acabado de la superficie superior del espécimen.**

Para garantizar que el porcentaje de compactación sea el deseado en los especímenes, es necesario que la mezcla de suelo cemento posea la humedad óptima (determinada con AASHTO T 134), esta puede chequearse tomando una muestra de la mezcla antes de iniciar la compactación, para encontrar la humedad presente en la mezcla mediante secado al horno, aunque si se desean resultados inmediatos puede realizarse el secado por calentamiento directo (ASTM D 4959).

Hay que tener presente que la mezcla utilizada contiene cemento por lo tanto el procedimiento de mezclado y compactado de los especímenes debe ser continuo y el tiempo entre el mezclado con agua y la compactación final no debe exceder 30 min.<sup>21</sup>

---

<sup>21</sup> Nota 5, ASTM D 1632.

### 3.4 . Curado de especímenes.

Después de elaborados los especímenes, estos 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 en los moldes en un cuarto húmedo por 12 horas, o más tiempo si se requiere, para poder remover posteriormente los especímenes de los moldes. El desmoldado puede realizarse utilizando un extractor de muestras de pistón hidráulico teniendo cuidado de no dañar los especímenes, especialmente las aristas que a esta edad aún son muy frágiles (ver fig. 3.25). Es importante identificar cada uno de los especímenes para evitar confusiones durante su almacenamiento y su manipulación durante los ensayos posteriores (ver fig. 3.26). Una vez desmoldados los especímenes deben de colocarse nuevamente en el cuarto húmedo, en un lugar seguro y protegidos de cualquier tipo de goteo hasta la correspondiente fecha de ensayo.



**Fig. 3. 25. Desmoldado de cilindro por medio de extractor de muestras.**



**Fig. 3. 26. Rotulado de cilindros previo al almacenamiento.**

Una practica de curado que brinda resultados satisfactorios es evitando la evaporación del agua presente en el espécimen por medio del confinamiento, dicho confinamiento se puede realizar cubriendo el espécimen con papel húmedo (ver fig. 3.27) y posteriormente almacenarlo en bolsas plásticas debidamente cerradas.



**Fig. 3. 27. Curado de especímenes utilizando papel húmedo.**

Para el desarrollo de la investigación se utilizo el método de curado descrito anteriormente, al mismo tiempo se almacenaron los especímenes en un cuarto húmedo, como se muestra en la siguiente figura 3.28.



**Fig. 3. 28. Almacenamiento de especímenes en cuarto húmedo.**

### **3.5 Ensayo para la determinación del Modulo de Elasticidad Dinámico.**

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 viájale tiempo, la longitud y frecuencia de onda de la siguiente manera:

$$V = \frac{S}{t} \qquad V = \lambda f$$

Donde:

V= Velocidad

S= Distancia entre transductores

t= tiempo

$\lambda$ = 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 modulo de de elasticidad esta relacionado de la siguiente manera:

$$E = \frac{V^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu}$$

Donde:

E= Modulo de elasticidad dinámico

V= Velocidad

$\rho$ = Densidad

$\nu$ = 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.***

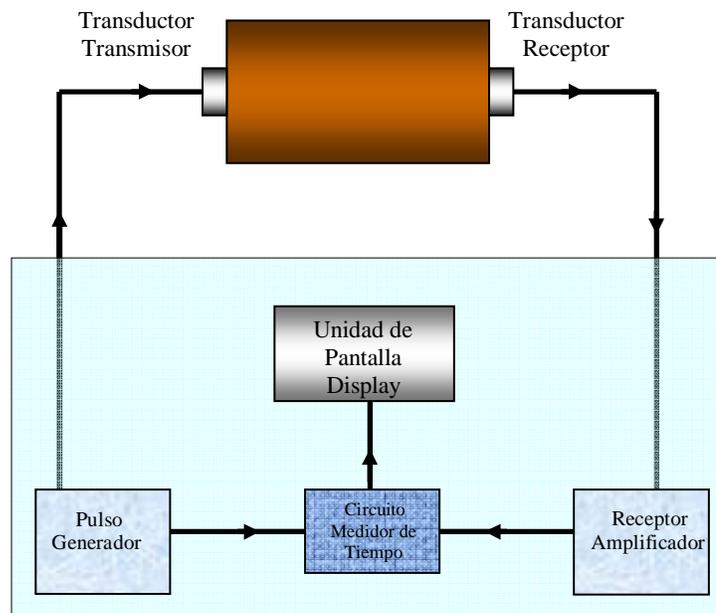
Las ondas acústicas rebotan según el material que se examina. Los cambios son distintos dependiendo de la concentración, estructura, orientación de las fibras, porosidad, tamaño de la partícula, y otras variaciones microestructurales que afectan la amplitud, la dirección, y la frecuencia de las señales 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. 3.29, 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.



**Fig. 3. 29. Funcionamiento 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. El transductor deberá ser construido de material piezoeléctrico, magnetostrictivo, u otro material sensitivo al voltaje (sal de Rochelle, cuarzo, titanato de bario, zirconato-titanato (PZT), y ser fuerte), aislados para su protección. 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. 3.30.



**Fig. 3. 30 Equipo utilizado en el ensayo de pulso ultrasónico.**

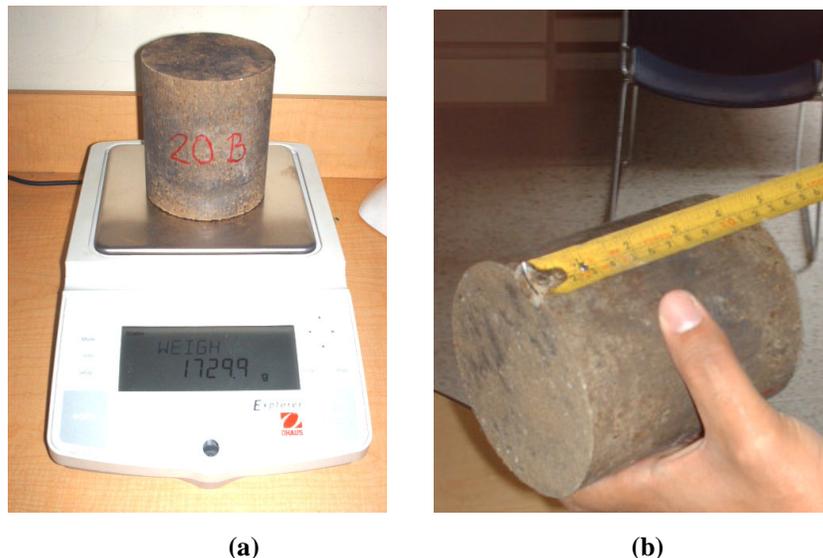
- 1: Teclado para control del equipo y ingreso de datos.
- 2: Pulso generador.
- 3: Transductor emisor de ondas.
- 4: Transductor receptor de ondas.
- 5: Receptor amplificador de pulso.
- 6: Pantalla de emisión de resultados de ensayos.

### **Ensayo De Pulso Ultrasónico.**

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

Luego de haber curado los especímenes y cumplida la fecha de ensayo estos son transportados al laboratorio, donde se les practico el ensayo de pulso ultrasónico y el ensayo de resistencia a compresión.

Para la utilización del equipo de pulso ultrasónico es necesario ingresar el peso volumétrico del espécimen a ser ensayado y la distancia entre transductores que será el alto del espécimen, se procede a pesar cada uno de los especímenes (fig. 3.31a) y a medir sus dimensiones (fig. 3.31b) para calcular su volumen.



**Fig. 3. 31 Medida del peso y dimensiones del espécimen previo al ensayo de pulso ultrasónico.**

Los especímenes poseen 10.1 cm. en diámetro y 11.6 cm. en altura estas dimensiones son constantes en todos los especímenes a ser ensayados en cuanto al peso de los especímenes se obtuvieron resultados variables esto debido a la proporción de cemento en las muestras, tipo de cemento, etc.

**Calculo de área, volumen y peso volumétrico de las muestras.**

Dimensiones

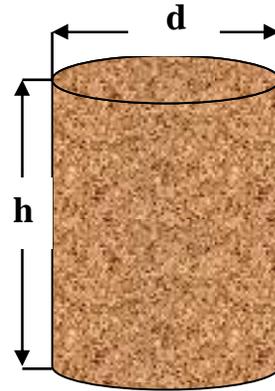
d = diámetro = 10.1 cm.

h = altura de la probeta = 11.6 cm.

A= área transversal

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

$$A = \frac{\pi}{4} (10.1 \text{ cm})^2 = 80.12 \text{ cm}^2$$



V= volumen del espécimen

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

$$V = \frac{\pi}{4} (10.1)^2 (11.6) = 929.39 \text{ cm}^3$$

$\gamma$ . = peso volumétrico

$$\gamma = \frac{\text{peso del espécimen}}{\text{volumen del espécimen}} = \frac{W}{V}$$

Una vez obtenidas las dimensiones y el peso de cada uno de los especímenes se procede al cálculo del peso volumétrico del espécimen este dato debe ser ingresado en unidades del sistema ingles (lb. /ft<sup>3</sup>) y la distancia entre transductores en (pulg.) estos son los parámetros que se deben ingresar al equipo de ensayo.

***Chequeo Funcional de Equipos y Ajuste de tiempo Cero:*** Se debe Verificar que el equipo esta 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.

Para algunos instrumentos, el ajuste a cero es hecho mediante la aplicación del agente de acoplamiento y presionando las caras de los transductores juntos, esta fue la forma de ajuste del equipo para la realización del ensayo (Fig. 3.32).



**Fig. 3. 32. Calibración del equipo utilizado.**

Una vez ajustado el equipo se procede a ingresar el peso volumétrico de los especímenes de ensayo y a ingresar la distancia entre transductores. 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 grasa figura 3.33.



**Fig. 3. 33. Proceso de engrasado de transductores y superficies laterales del espécimen.**

Engrasado los transductores y el espécimen se procede a juntarlo con las caras del espécimen 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. Fig. 3.34.



**Fig. 3. 34. Ensayo de probetas, se observa la alineación de los transductores en el espécimen.**

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, el equipo procesa los datos obtenidos y calcula internamente el Modulo de Elasticidad Dinámico y Coeficiente de Poisson, los cuales son parámetros que están relacionados directamente con la velocidad de pulso.

### 3.5.1 Resultados obtenidos del ensayo de pulso ultrasónico utilizando cemento ASTM C-91 tipo M.



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento

SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)

CEMENTO: ASTM C-91 tipo M.

EDAD DE ENSAYO: 3 días



**Instituto  
Salvadoreño del  
Cemento  
y del Concreto**

Espécimen N.	Cantidad de Cemento (% En peso)	Masa (gr.)	Volumen (cm <sup>3</sup> .)	Peso Volumétrico (lb./pie <sup>3</sup> )	Distancia entre transductores (pulg.)	Tiempo (micro seg.)	Velocidad (ft/seg.)	Modulo de Elasticidad Dinámico (E x 10 <sup>6</sup> ) psi
17 A	2%	1717,7	929.37	115,4	4.6	53.9	7191	1,283
17 B	2%	1716,2	929.37	115,3	4.6	60.1	6378	1,015
18 A	4%	1705,4	929.37	114,6	4.6	49.0	7854	1,518
18 B	4%	1730,3	929.37	116,2	4.6	49.7	7717	1,466
19 A	6%	1734,8	929.37	116,5	4.6	43.7	8781	1,931
19 B	6%	1713,7	929.37	115,1	4.6	43.6	8802	1,921
20 A	8%	1752,2	929.37	117,7	4.6	43.9	8726	1,933
20 B	8%	1729.9	929.37	116,2	4.6	41.7	9203	2,126

**Tabla 3. 7.**



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento

SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)

CEMENTO: ASTM C-91 tipo M.

EDAD DE ENSAYO: 7 días



Instituto  
Salvadoreño del  
Cemento  
y del Concreto

Espécimen N.	Cantidad de Cemento (% En peso)	Masa (gr.)	Volumen (cm <sup>3</sup> .)	Peso Volumétrico (lb./pie <sup>3</sup> )	Distancia entre transductores (pulg.)	Tiempo (micro seg.)	Velocidad (ft/seg.)	Modulo de Elasticidad Dinámico (E x 10 <sup>6</sup> ) psi
21 A	2%	1720.0	929.37	115,6	4.6	44.95	8527.5	1,799
21 B	2%	1684.2	929.37	113,2	4.6	49.0	7823.0	1,490
22 A	4%	1683.4	929.37	113,1	4.6	51.2	7486.5	1,364
22 B	4%	1703.1	929.37	114,4	4.6	49.95	7628.5	1,433
23 A	6%	1730.1	929.37	116,2	4.6	45.3	8461.5	1,791
23 B	6%	1734.0	929.37	116,5	4.6	51.65	7421.0	1,380
24 A	8%	1731.1	929.37	116,3	4.6	44.7	8570.0	1,840
24 B	8%	1744.7	929.37	117,2	4.6	40.65	9429.5	2,244

Tabla 3. 8.



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento

SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)

CEMENTO: ASTM C-91 tipo M.

EDAD DE ENSAYO: 28 días



**Instituto  
Salvadoreño del  
Cemento  
y del Concreto**

Espécimen N.	Cantidad de Cemento (% En peso)	Masa (gr.)	Volumen (cm <sup>3</sup> .)	Peso Volumétrico (lb./pie <sup>3</sup> )	Distancia entre transductores (pulg.)	Tiempo (micro seg.)	Velocidad (ft/seg.)	Modulo de Elasticidad Dinámico (E x 10 <sup>6</sup> ) psi
13 A	2%	1720,5	929.37	115,6	4.6	46.50	5289	1,618
13 B	2%	1736,3	929.37	116,7	4.6	44.50	8619	1,725
14 A	4%	1729,5	929.37	116,2	4.6	44.75	8566	1,834
14 B	4%	1720,0	929.37	115,6	4.6	46.20	8297	1,712
15 A	6%	1716,9	929.37	115,3	4.6	44.05	8702	1,880
15 B	6%	1728,3	929.37	116,1	4.6	44.35	8643	1,867
16 A	8%	1714,9	929.37	115,2	4.6	41.30	9281	2,136
16 B	8%	1706,5	929.37	114,6	4.6	40.15	9547	2,249

**Tabla 3. 9.**



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento

SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)

CEMENTO: ASTM C-91 tipo M.

EDAD DE ENSAYO: 60 días



Instituto  
Salvadoreño del  
Cemento  
y del Concreto

Espécimen N.	Cantidad de Cemento (% En peso)	Masa (gr.)	Volumen (cm <sup>3</sup> .)	Peso Volumétrico (lb./pie <sup>3</sup> )	Distancia entre transductores (pulg.)	Tiempo (micro seg.)	Velocidad (Ft/seg.)	Modulo de Elasticidad Dinámico (E x 10 <sup>6</sup> ) psi
9 A	2%	1708,8	929.37	114,8	4.6	59.55	6437	1,024
9 B	2%	1712,2	929.37	115,0	4.6	57.8	6632	1,088
10 A	4%	1693,8	929.37	113,8	4.6	44.3	8653	1,832
10 B	4%	1723,8	929.37	115,8	4.6	44.7	8576	1,831
11 A	6%	1728,5	929.37	116,1	4.6	40.05	9571	2,290
11 B	6%	1720,2	929.37	115,6	4.6	40.1	9569	2,272
12 A	8%	1745,9	929.37	117,3	4.6	40.05	9572	2,312
12 B	8%	1710,2	929.37	114,9	4.6	48.45	7912	1,547

Tabla 3. 10.



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento

SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)

CEMENTO: ASTM C-91 tipo M.

EDAD DE ENSAYO: 90 días



**Instituto  
Salvadoreño del  
Cemento  
y del Concreto**

Espécimen N.	Cantidad de Cemento (% En peso)	Masa (gr.)	Volumen (cm <sup>3</sup> .)	Peso Volumétrico (lb./pie <sup>3</sup> )	Distancia entre transductores (pulg.)	Tiempo (micro seg.)	Velocidad (Ft/seg.)	Modulo de Elasticidad Dinámico (E x 10 <sup>6</sup> ) psi
5 A	2%	1687,0	929.37	113,3	4.6	44.4	8633.8	1,817
5 B	2%	1686,0	929.37	113,3	4.6	59.4	6453.4	1,015
6 A	4%	1688,0	929.37	113,4	4.6	43.7	8771.9	1,877
6 B	4%	1703,4	929.37	114,4	4.6	44.3	8662.9	1,848
7 A	6%	1701,5	929.37	114,3	4.6	41.9	9148.8	2,059
7 B	6%	1709,2	929.37	114,8	4.6	41.3	9281.7	2,128
8 A	8%	1711,4	929.37	115,0	4.6	38.45	9969.7	2,458
8 B	8%	1710,6	929.37	114,9	4.6	38.4	9982.6	2,464

**Tabla 3. 11.**

### 3.5.2 Resultados obtenidos del ensayo de pulso ultrasónico utilizando cemento ASTM C-1157 tipo HE.



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento

SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)

CEMENTO: ASTM C-1157 tipo HE.

EDAD DE ENSAYO: 3 días



**Instituto  
Salvadoreño del  
Cemento  
y del Concreto**

Espécimen N.	Cantidad de Cemento (% En peso)	Masa (gr.)	Volumen (cm <sup>3</sup> .)	Peso Volumétrico (lb./pie <sup>3</sup> )	Distancia entre transductores (pulg.)	Tiempo (micro seg.)	Velocidad (ft/seg.)	Modulo de Elasticidad Dinámico (E x 10 <sup>6</sup> ) psi
17 C	2%	1713,1	929.37	115,1	4.6	49.65	7737	1,481
17 D	2%	1718,9	929.37	115,5	4.6	46.15	8315	1,720
18 C	4%	1718,2	929.37	115,4	4.6	43.2	8873	1,964
18 D	4%	1709,2	929.37	114,8	4.6	42.8	8956	1,989
19 C	6%	1706,5	929.37	114,6	4.6	41.65	9403	2,100
19 D	6%	1718,2	929.37	115,4	4.6	41.6	9214	2,118
20 C	8%	1731,7	929.37	116,3	4.6	41.85	9159	2,106
20 D	8%	1724,9	929.37	115,9	4.6	41.7	9192	2,108

**Tabla 3. 12.**



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento

SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)

CEMENTO: ASTM C-1157 tipo HE.

EDAD DE ENSAYO: 7 días



**Instituto  
Salvadoreño del  
Cemento  
y del Concreto**

Espécimen N.	Cantidad de Cemento (% En peso)	Masa (gr.)	Volumen (cm <sup>3</sup> .)	Peso Volumétrico (lb./pie <sup>3</sup> )	Distancia entre transductores (pulg.)	Tiempo (micro seg.)	Velocidad (ft/seg.)	Modulo de Elasticidad Dinámico (E x 10 <sup>6</sup> ) psi
21 C	2%	1690.8	929.37	113,6	4.6	52.7	7273.5	1,292
21 D	2%	1723.7	929.37	115,8	4.6	53.3	7191.5	1,288
22 C	4%	1689.3	929.37	113,5	4.6	42.4	9040.5	1,995
22 D	4%	1707.1	929.37	114,7	4.6	43.05	8904.0	1,956
23 C	6%	1721.5	929.37	115,7	4.6	39.8	9631.0	2,309
23 D	6%	1731.9	929.37	116,4	4.6	40.7	9418.5	2,219
24 C	8%	1723.1	929.37	115,8	4.6	39.5	9704.5	2,346
24 D	8%	1721.2	929.37	115,6	4.6	39.05	9816.0	2,398

**Tabla 3. 13.**



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento

SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)

CEMENTO: ASTM C-1157 tipo HE.

EDAD DE ENSAYO: 28 días



Instituto  
Salvadoreño del  
Cemento  
y del Concreto

Espécimen N.	Cantidad de Cemento (% En peso)	Masa (gr.)	Volumen (cm <sup>3</sup> .)	Peso Volumétrico (lb./pie <sup>3</sup> )	Distancia entre transductores (pulg.)	Tiempo (micro seg.)	Velocidad (ft/seg.)	Modulo de Elasticidad Dinámico (E x 10 <sup>6</sup> ) psi
13 C	2%	1708,8	929.37	114,8	4.6	39.8	9631.5	2,291
13 D	2%	1712,2	929.37	115,0	4.6	44.95	8527.5	1,800
14 C	4%	1706,5	929.37	114,6	4.6	42.25	9073.00	2,031
14 D	4%	1740,0	929.37	116,9	4.6	41.20	9303.5	2,177
15 C	6%	1699,4	929.37	114,2	4.6	39.80	9631.0	2,278
15 D	6%	1725,3	929.37	115,9	4.6	39.40	9730.0	2,361
16 C	8%	1704,0	929.37	114,5	4.6	37.65	10181.5	2,553
16 D	8%	1695,7	929.37	113,9	4.6	37.45	10235.00	2,569

Tabla 3. 14.



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento

SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)

CEMENTO: ASTM C-1157 tipo HE.

EDAD DE ENSAYO: 60 días



**Instituto  
Salvadoreño del  
Cemento  
y del Concreto**

Espécimen N.	Cantidad de Cemento (% En peso)	Masa (gr.)	Volumen (cm <sup>3</sup> .)	Peso Volumétrico (lb./pie <sup>3</sup> )	Distancia entre transductores (pulg.)	Tiempo (micro seg.)	Velocidad (ft/seg.)	Modulo de Elasticidad Dinámico (E x 10 <sup>6</sup> ) psi
9 C	2%	1714,1	929.37	115,2	4.6	53.4	7178.75	1,277
9 D	2%	1707,0	929.37	114,7	4.6	49.3	7775.53	1,491
10 C	4%	1716,9	929.37	115,3	4.6	41.95	9137.98	2,072
10 D	4%	1719,3	929.37	115,5	4.6	41.8	9170.71	2,089
11 C	6%	1733,3	929.37	116,4	4.6	39.75	9643.6	2,330
11 D	6%	1731,0	929.37	116,3	4.6	38.2	10034.97	2,519
12 C	8%	1722,8	929.37	115,7	4.6	36.25	10574.74	2,785
12 D	8%	1720,8	929.37	115,6	4.6	37.4	10249.65	2,612

**Tabla 3. 15.**



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento

SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)

CEMENTO: ASTM C-1157 tipo HE.

EDAD DE ENSAYO: 90 días



**Instituto  
Salvadoreño del  
Cemento  
y del Concreto**

Espécimen N.	Cantidad de Cemento (% En peso)	Masa (gr.)	Volumen (cm <sup>3</sup> .)	Peso Volumétrico (lb./pie <sup>3</sup> )	Distancia entre transductores (pulg.)	Tiempo (micro seg.)	Velocidad (ft/seg.)	Modulo de Elasticidad Dinámico (E x 10 <sup>6</sup> ) psi
5 C	2%	1692,9	929.37	113,7	4.6	51.3	7479.7	1,369
5 D	2%	1684,7	929.37	113,2	4.6	51.4	7465.1	1,357
6 C	4%	1694,4	929.37	113,8	4.6	42.1	9116.1	2,035
6 D	4%	1705,0	929.37	114,5	4.6	41.95	9148.5	2,058
7 C	6%	1696,6	929.37	114,0	4.6	38.5	9956.7	2,431
7 D	6%	1696,5	929.37	114,0	4.6	38.1	10061.2	2,482
8 C	8%	1711,1	929.37	115,0	4.6	36.0	10648.2	2,804
8 D	8%	1715,2	929.37	115,2	4.6	36.5	10502.3	2,735

**Tabla 3. 16.**

### **3.6. Ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión (ASTM D 1633-96).**

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./cm<sup>2</sup> 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,  $f'c$ .

Los requerimientos para la resistencia a la compresión en suelo cemento pueden variar, en nuestro país se requiere resistencias superiores a las presentadas en la tabla 2.10 (capítulo anterior).

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 A que corresponde a el procedimiento que usa para el ensayo de especímenes de 4.0 pulgadas. (101.6 mm) en diámetro y 4.584 pulgadas. (116.4 mm) en altura.

La relación altura-diámetro es igual a 1.15. Este método de ensayo se realiza sólo en materiales con 30% o menos retenido en el tamiz de 3/4 de pulgada.

### **Realización de ensayo de resistencia a compresión.**

Luego de la realización del ensayo de pulso ultrasónico los especímenes son colocados a saturación por medio de inmersión en agua durante un periodo de cuatro horas (fig. 3.35) esto con el objeto de simular las condiciones más desfavorables a las que puede estar expuesto el material<sup>22</sup>.



**Fig. 3. 35. Saturación de especímenes previo a el ensayo de compresión.**

Cumplidas las cuatro horas los especímenes son sacados e inmediatamente ensayados a compresión Fig. 3.36

---

<sup>22</sup> Norma ASTM D 1633.



Fig. 3. 36. Especímenes saturados superficialmente secos.

**Maquina de ensayo a compresi3n:** esta m1quina puede ser de cualquier tipo que tenga la capacidad suficiente y que se pueda controlar para proporcionar la raz3n de carga prescrita en la norma utilizada (ASTM D 1633), La raz3n de carga aplicada debe de oscilar entre el rango de 20 +/-10 psi (140 +/-70 kPa)/s fig. 3.37.



Fig. 3. 37. Maquina de ensayo a compresi3n.

Para la realización del ensayo de compresión no es necesaria la colocación de almohadillas de neopreno a los especímenes para cabeceo (tapas no adheridas), debido a que los esfuerzos que estos soportan son inferiores a  $106 \text{ kg/cm}^2$  ( $1500 \text{ psi}$ )<sup>23</sup> y no es aplicable este tipo de cabeceo según Norma ASTM C 1231-00 (Uso De Tapas No Adheridas En La Determinación Del Esfuerzo De Compresión De Cilindros De Concreto Endurecido). El método utilizado fue pulir las caras de los especímenes durante su elaboración procurando obtener superficies lisas y planas.

Los especímenes fueron colocados en la maquina de compresión y se obtuvo la carga de falla Fig. 3.38 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 los especímenes no poseen una relación 2:1 como lo expuesto en (capitulo 2 sección 2.4.1, el factor de corrección utilizado fue de 0.90).



**Fig. 3.38. Ensayo de compresión en especímenes de suelo cemento.**

Luego de la realización del ensayo de compresión se retiró el espécimen y se observó que el tipo de falla producido Fig. 3.39, para estos especímenes fue de tipo

---

<sup>23</sup> ASTM C 1231 requisito para el uso de tapas no adheridas en concreto

cónico que es una de las fallas que indica que los esfuerzos de compresión son distribuidos más adecuadamente.



**Fig. 3. 39. Falla cónica presentada en los especímenes ensayados.**

### 3.6.1 Resultados obtenidos utilizando cemento ASTM C-91 Tipo M



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento

SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)

CEMENTO: ASTM C-91 tipo M.

EDAD DE ENSAYO: 3 días



Instituto  
Salvadoreño del  
Cemento  
y del Concreto

Espécimen No.	Porcentaje de Cemento (%)	Diámetro del Espécimen (cm.)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga de Compresión (Kg.)	Esfuerzo de Compresión (Kg./cm <sup>2</sup> )	Promedio (Kg./cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de compresión x 0.9 (Kg./cm <sup>2</sup> )
17 A	2%	10.10	80.12	530	6.62	7.24	6.52
17 B	2%	10.10	80.12	630	7.86		
18 A	4%	10.10	80.12	1000	12.48	12.73	11.46
18 B	4%	10.10	80.12	1040	12.98		
19 A	6%	10.10	80.12	1240	15.48	16.35	14.72
19 B	6%	10.10	80.12	1380	17.22		
20 A	8%	10.10	80.12	1680	20.97	19.72	17.75
20 B	8%	10.10	80.12	1480	18.47		

Tabla 3. 17.



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento

SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)

CEMENTO: ASTM C-91 tipo M.

EDAD DE ENSAYO: 7 días



Instituto  
Salvadoreño del  
Cemento  
y del Concreto

Espécimen No.	Porcentaje de Cemento (%)	Diámetro del Espécimen (cm.)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga de Compresión (Kg.)	Esfuerzo de Compresión (Kg./cm <sup>2</sup> )	Promedio (Kg./cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de compresión x 0.9 (Kg./cm <sup>2</sup> )
21 A	2%	10.10	80.12	2410	30,08	29,27	26,34
21 B	2%	10.10	80.12	2280	28,46		
22 A	4%	10.10	80.12	4020	50,18	49,55	44,60
22 B	4%	10.10	80.12	3920	48,93		
23 A	6%	10.10	80.12	4394	54,84	55,26	49,73
23 B	6%	10.10	80.12	4460	55,67		
24 A	8%	10.10	80.12	6290	78,51	80,19	72,17
24 B	8%	10.10	80.12	6560	81,88		

Tabla 3. 18.



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento

SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)

CEMENTO: ASTM C-91 tipo M.

EDAD DE ENSAYO: 28 días



Instituto  
Salvadoreño del  
Cemento  
y del Concreto

Espécimen No.	Porcentaje de Cemento (%)	Diámetro del Espécimen (cm.)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga de Compresión (Kg.)	Esfuerzo de Compresión (Kg./cm <sup>2</sup> )	Promedio (Kg./cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de compresión x 0.9 (Kg./cm <sup>2</sup> )
13 A	2%	10.10	80.12	2640	32,95	27,40	24,66
13 B	2%	10.10	80.12	1750	21,84		
14 A	4%	10.10	80.12	5200	64,90	61,91	55,72
14 B	4%	10.10	80.12	4720	58,91		
15 A	6%	10.10	80.12	6610	82,50	82,32	74,08
15 B	6%	10.10	80.12	6580	82,13		
16 A	8%	10.10	80.12	7210	89,99	91,99	82,79
16 B	8%	10.10	80.12	7530	93,99		

Tabla 3. 19.



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento  
 SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)  
 CEMENTO: ASTM C-91 tipo M.  
 EDAD DE ENSAYO: 60 días



Espécimen No.	Porcentaje de Cemento (%)	Diámetro del Espécimen (cm.)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga de Compresión (Kg.)	Esfuerzo de Compresión (Kg./cm <sup>2</sup> )	Promedio (Kg./cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de compresión x 0.9 (Kg./cm <sup>2</sup> )
9 A	2%	10.10	80.12	2990	37,32	37,26	33,53
9 B	2%	10.10	80.12	2980	37,19		
10 A	4%	10.10	80.12	5660	70,65	70,46	63,41
10 B	4%	10.10	80.12	5630	70,27		
11 A	6%	10.10	80.12	8820	110,09	106,90	96,21
11 B	6%	10.10	80.12	8310	103,72		
12 A	8%	10.10	80.12	10240	127,81	109,53	98,57
12 B	8%	10.10	80.12	7310	91,24		

Tabla 3. 20.



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento

SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)

CEMENTO: ASTM C-91 tipo M.

EDAD DE ENSAYO: 90 días



Instituto  
Salvadoreño del  
Cemento  
y del Concreto

Espécimen No.	Porcentaje de Cemento (%)	Diámetro del Espécimen (cm.)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga de Compresión (Kg.)	Esfuerzo de Compresión (Kg./cm <sup>2</sup> )	Promedio (Kg./cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de compresión x 0.9 (Kg./cm <sup>2</sup> )
5 A	2%	10.10	80.12	2610	32,58	34,32	30,89
5 B	2%	10.10	80.12	2890	36,07		
6 A	4%	10.10	80.12	6010	75,01	76,51	68,86
6 B	4%	10.10	80.12	6250	78,01		
7 A	6%	10.10	80.12	8970	111,96	105,28	94,75
7 B	6%	10.10	80.12	7900	98,60		
8 A	8%	10.10	80.12	10460	130,56	134,68	121,21
8 B	8%	10.10	80.12	11120	138,79		

Tabla 3. 21.

### 3.6.2 Resultados obtenidos utilizando cemento ASTM C-1157 tipo HE.



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento  
 SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)  
 CEMENTO: ASTM C-1157 tipo HE.  
 EDAD DE ENSAYO: 3 días



Instituto  
 Salvadoreño del  
 Cemento  
 y del Concreto

Espécimen No.	Porcentaje de Cemento (%)	Diámetro del Espécimen (cm.)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga de Compresión (Kg.)	Esfuerzo de Compresión (Kg./cm <sup>2</sup> )	Promedio (Kg./cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de compresión x 0.9 (Kg./cm <sup>2</sup> )
17 C	2%	10.10	80.12	970	12,11	11,67	10,50
17 D	2%	10.10	80.12	900	11,23		
18 C	4%	10.10	80.12	1690	21,09	20,84	18,76
18 D	4%	10.10	80.12	1650	20,59		
19 C	6%	10.10	80.12	2410	30,08	28,27	25,44
19 D	6%	10.10	80.12	2120	26,46		
20 C	8%	10.10	80.12	2320	28,96	30,33	27,30
20 D	8%	10.10	80.12	2540	31,70		

Tabla 3. 22.



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento  
 SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)  
 CEMENTO: ASTM C-1157 tipo HE.  
 EDAD DE ENSAYO: 7 días



Espécimen No.	Porcentaje de Cemento (%)	Diámetro del Espécimen (cm.)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga de Compresión (Kg.)	Esfuerzo de Compresión (Kg./cm <sup>2</sup> )	Promedio (Kg./cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de compresión x 0.9 (Kg./cm <sup>2</sup> )
21 C	2%	10.10	80.12	3294	41,11	43,09	38,78
21 D	2%	10.10	80.12	3610	45,06		
22 C	4%	10.10	80.12	5030	62,78	60,60	54,54
22 D	4%	10.10	80.12	4681	58,43		
23 C	6%	10.10	80.12	6840	85,37	81,32	73,19
23 D	6%	10.10	80.12	6190	77,26		
24 C	8%	10.10	80.12	7070	88,24	90,30	81,27
24 D	8%	10.10	80.12	7400	92,36		

Tabla 3. 23.



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento  
 SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)  
 CEMENTO: ASTM C-1157 tipo HE.  
 EDAD DE ENSAYO: 28 días



Espécimen No.	Porcentaje de Cemento (%)	Diámetro del Espécimen (cm.)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga de Compresión (Kg.)	Esfuerzo de Compresión (Kg./cm <sup>2</sup> )	Promedio (Kg./cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de compresión x 0.9 (Kg./cm <sup>2</sup> )
13 C	2%	10.10	80.12	3170	39,57	40,88	36,79
13 D	2%	10.10	80.12	3380	42,19		
14 C	4%	10.10	80.12	5790	72,27	77,57	69,82
14 D	4%	10.10	80.12	6640	82,88		
15 C	6%	10.10	80.12	7140	89,12	87,68	78,91
15 D	6%	10.10	80.12	6910	86,25		
16 C	8%	10.10	80.12	7130	88,99	108,46	97,62
16 D	8%	10.10	80.12	10250	127,94		

Tabla 3. 24.



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento  
 SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)  
 CEMENTO: ASTM C-1157 tipo HE.  
 EDAD DE ENSAYO: 60 días



Espécimen No.	Porcentaje de Cemento (%)	Diámetro del Espécimen (cm.)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga de Compresión (Kg.)	Esfuerzo de Compresión (Kg./cm <sup>2</sup> )	Promedio (Kg./cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de compresión x 0.9 (Kg./cm <sup>2</sup> )
9 C	2%	10.10	80.12	3470	43,31	43,00	38,70
9 D	2%	10.10	80.12	3420	42,69		
10 C	4%	10.10	80.12	6450	80,51	77,82	70,04
10 D	4%	10.10	80.12	6020	75,14		
11 C	6%	10.10	80.12	9060	113,08	105,22	94,70
11 D	6%	10.10	80.12	7800	97,36		
12 C	8%	10.10	80.12	10800	134,80	144,97	130,48
12 D	8%	10.10	80.12	12430	155,14		

Tabla 3. 25.



TIPO DE MATERIAL: Suelo Cemento

SUELO: Arena limosa (SM, A-2-4)

CEMENTO: ASTM C-1157 tipo HE.

EDAD DE ENSAYO: 90 días



Instituto  
Salvadoreño del  
Cemento  
y del Concreto

Espécimen No.	Porcentaje de Cemento (%)	Diámetro del Espécimen (cm.)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga de Compresión (Kg.)	Esfuerzo de Compresión (Kg./cm <sup>2</sup> )	Promedio (Kg./cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de compresión x 0.9 (Kg./cm <sup>2</sup> )
5 C	2%	10.10	80.12	3870	48,30	49,86	44,88
5 D	2%	10.10	80.12	4120	51,42		
6 C	4%	10.10	80.12	8290	103,47	97,23	87,51
6 D	4%	10.10	80.12	7290	90,99		
7 C	6%	10.10	80.12	9930	123,94	121,76	109,58
7 D	6%	10.10	80.12	9580	119,57		
8 C	8%	10.10	80.12	10350	129,18	141,73	127,55
8 D	8%	10.10	80.12	12360	154,27		

Tabla 3. 26.

### 3.7. Determinación del coeficiente estructural de capa.

Actualmente están usándose diferentes métodos para el diseño de pavimentos. El método de diseño de pavimentos flexibles AASHTO 93, combina propiedades de las capas de pavimento de asfalto y espesores en una variable, llamada el número estructural, SN.

El SN es un número abstracto que expresa la resistencia estructural necesaria del pavimento, para dar apoyo a las combinaciones de suelo, el tráfico total expresado en ejes sencillos equivalentes de carga de 18 kip, serviciabilidad final y el medio ambiente.

#### **Coeficiente de Capa.**

El coeficiente estructural de capa expresa la relación empírica entre el número estructural y el espesor; es una medida de la capacidad del material para funcionar como parte integrante de la estructura de pavimento; a cada capa estructural de pavimento se le asigna un coeficiente de capa ( $a_i$ ) con el fin de convertir el espesor de la capa ( $D_i$ ) en un número estructural. Una vez que el número estructural de un pavimento está determinado, un conjunto de espesores de capa y los coeficientes de capa correspondientes son elegidos. Cuando se combina, la suma de cada espesor de capa debe proporcionar la capacidad de carga correspondiente al número estructural como se muestra en la siguiente ecuación:

$$SN = \sum_{i=1}^n a_i D_i$$

El método de diseño AASTHO 93 ha adoptado el módulo de resiliencia ( $M_r$ ) para determinar la calidad de la subrasante, también es necesario identificar los correspondientes coeficientes de capa. Estos coeficientes de capa, como ya fue mencionado, son de naturaleza empírica y se basan en observaciones realizadas en la

prueba original AASHO y han sido comprobados a través de investigaciones más recientes y estudios de campo.

Investigaciones y estudios de campo indican que muchos factores influyen en los coeficientes de capa<sup>24</sup>. De este modo, las experiencias de los organismos deben incluirse en la estimación de los valores del coeficiente. Por ejemplo, el coeficiente de capa puede variar con el espesor, soporte de la capa subyacente, la posición en la estructura de pavimento, etc.

La tabla 3.28 da algunos valores típicos de coeficientes estructurales de capa. Estos coeficientes estructurales de capa fueron desarrollados originalmente en unidades del sistema inglés junto con la demás información que se obtuvo a partir de la prueba AASHO, por lo que al realizarse el diseño debe utilizarse unidades congruentes.

---

<sup>24</sup> Asphalt pavements.-Patrick G. Lavin.

<b>Tipo de Material</b>	<b>Coefficiente de capa (1/pulg.)</b>
<b>Coefficientes de la capa de subbase</b>	
Arena gravosa	0.11
Arena arcillosa	0.08 (0.05-0.10)
Suelo tratado con cal	0.11
Arcilla tratada con cal	0.16 (0.14-0.18)
Roca triturada	0.14 (0.08-0.14)
<b>Coefficientes de la capa de base</b>	
Roca triturada	0.14 (0.08-0.14)
Arena gravosa	0.07
Base puzolánica	0.28 (0.25-0.30)
Base tratada con cal	0.22 (0.15-0.30)
Base tratada con cemento	0.27
Suelo cemento	0.20
Base tratada con asfalto, graduación gruesa	0.34
Base tratada con asfalto, graduación arenosa	0.30
Mezclas reciclada en el lugar	0.20
Mezcla reciclada, mezclada en planta	0.40 (0.40-0.44)
Mezcla asfáltica en caliente, densa	0.44
<b>Coefficientes de la capa de rodadura</b>	
Mezcla asfáltica en caliente, densa	0.44
Asfalto arenoso	0.40
Mezclas reciclada en el lugar	0.20
Mezcla reciclada, mezclada en planta	0.40 (0.40-0.44)

**Tabla 3. 27. Valores típicos de coeficientes estructurales de capa.**  
**Fuente: Asphalt Pavements, Patrick G. Laving**

La tabla 3.28 muestra valores de coeficiente de capa para diferentes estados de EEUU, relacionándolos con el esfuerzo de compresión que se requiere para poder utilizar dichos coeficientes.

Estado	Coefficiente de capa (a)	Esfuerzo de compresión requerido
Alabama	0.23	46 kg/cm <sup>2</sup> min.
	0.20	28-46 kg/cm <sup>2</sup>
	0.15	Al menos de 28 kg/cm <sup>2</sup>
Arizona	0.28	Para bases tratadas con cemento mínimo 56 kg/cm <sup>2</sup> (mezclado en planta)
	0.23	Para subrasantes tratadas con cemento con 56 kg/cm <sup>2</sup> (Mezclado en el lugar)
Delaware	0.20	
Florida	0.15	21 kg/cm <sup>2</sup> (mezclado en el lugar)
	0.20	35 kg/cm <sup>2</sup> (mezclado en planta)
Georgia	0.20	26 kg/cm <sup>2</sup>
Louisiana	0.15	14 kg/cm <sup>2</sup> min
	0.18	28 kg/cm <sup>2</sup> min.
	0.23	46 kg/cm <sup>2</sup> min.
Montana	0.20	28 kg/cm <sup>2</sup> min.
New México	0.23	46 kg/cm <sup>2</sup> min.
	0.17	28-46 kg/cm <sup>2</sup>
	0.12	Al menos de 28 kg/cm <sup>2</sup>
Pennsylvania	0.20	46 kg/cm <sup>2</sup> min. (mezclado en el lugar)
	0.30	46 kg/cm <sup>2</sup> min. (mezclado en planta)
Wisconsin	0.23	46 kg/cm <sup>2</sup> min.
	0.20	28-46 kg/cm <sup>2</sup>
	0.15	Al menos de 28 kg/cm <sup>2</sup>

**Tabla 3. 28. Ejemplos de coeficientes de capa para suelo-cemento usado por algunos estados.**  
Fuente: ACI 230.1R.

El método de diseño AASHTO para pavimentos flexibles se ha desarrollado en torno a una composición de triple capa en el pavimento, que esta compuesto por una capa de rodadura (capa uno), una capa de base (capa dos), y una capa de subbase (capa tres). La relación anterior se explica con mayor detalle en la siguiente ecuación.

$$SN = D_1 a_1 + D_2 a_2 m_2 + D_3 a_3 m_3$$

Donde:

$D_1$  = es el espesor de la capa de rodadura (pulgadas).

$a_1$  = el coeficiente de capa de la rodadura.

$D_2$  = el espesor de la base (pulgadas).

$a_2$  = el coeficiente de capa de la base.

$m_2$  = el coeficiente de drenaje de la base.

$D_3$  = el espesor de la subbase (pulgadas).

$a_3$  = el coeficiente de capa de la subbase.

$m_3$  = el coeficiente de drenaje de la subbase.

En esta ecuación también se ha introducido el concepto de coeficientes de drenaje,  $m_a$ . Los valores típicos de coeficientes de drenaje oscilan entre 0,40 a 1,40. Los efectos que el agua y el drenaje tienen sobre la capa de base y subbase deben ser considerados en el diseño del pavimento mediante el uso de un coeficiente de drenaje. El drenaje no se tiene en cuenta al determinar el espesor de la capa de rodadura. El efecto del drenaje pobre puede debilitar la estructura de pavimento y un excelente drenaje en el pavimento puede reducir el espesor requerido, afectando directamente a los coeficientes de capa en comparación a los coeficientes que se desarrollaron en torno a las condiciones originales de drenaje en la prueba AASHO. Valores superiores a 1.0 se asignan a capas de base con buen o excelente drenaje y rara vez son saturadas con agua. La calidad del drenaje en la prueba AASHO fue de un valor de 1.0. En la tabla 3.31 se dan algunas definiciones de la calidad de drenaje en una calificación de muy deficiente a excelente. Estas definiciones se definen en el tiempo que tarda el agua para que se le retire de la capa de pavimento, que generalmente se calcula mediante el uso de buenos criterios técnicos.

La tabla 3.30 da valores recomendados de coeficientes de drenaje en función de la calidad de drenaje y el porcentaje de tiempo durante el año que la estructura de pavimento de asfalto normalmente esta expuesta a niveles de saturación. Los niveles de humedad dependen de la media anual de las precipitaciones y las condiciones de drenaje.

<b>Calidad del Drenaje</b>	<b>50 % saturación</b>	<b>85% saturación</b>
Excelente	2 horas	2 horas
Bueno	1 día	2 a 5 horas
Regular	1 semana	5 a 10 horas
Pobre	1 mes	10 a 15 horas
Muy Pobre	El agua no drena	mayor de 15 horas

**Tabla 3. 29. Tiempos de drenaje para capas granulares**  
**Fuente: Guía para Diseño de Pavimentos, AASHTO 1,993**

<b>Calidad del Drenaje</b>	<b>P = % del tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación</b>			
	<b>&lt; 1%</b>	<b>1% - 5%</b>	<b>5% - 25%</b>	<b>&gt; 25%</b>
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy Pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

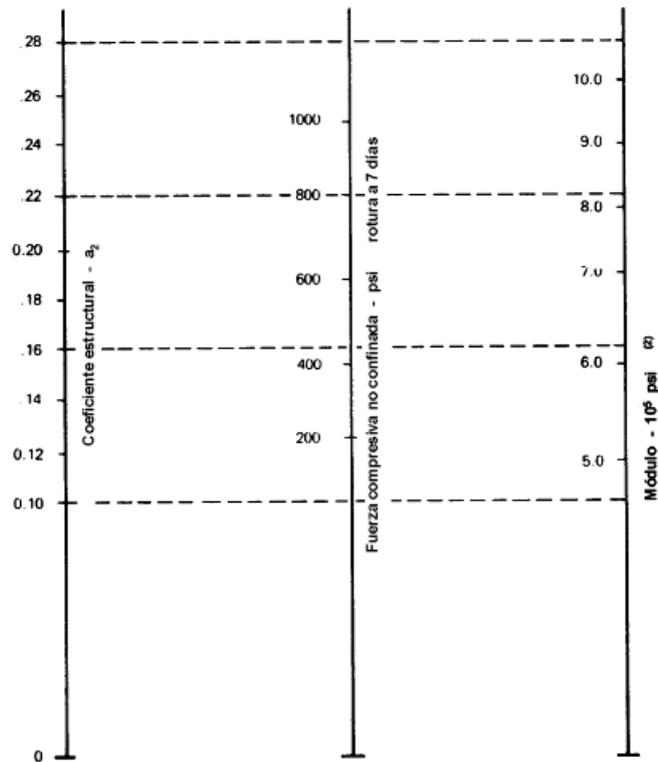
**Tabla 3. 30. Coeficientes de drenaje para pavimentos flexibles (mx)**  
**Fuente: Guía para Diseño de Pavimentos, AASHTO 1,993**

Existen diferentes investigaciones en las que se determina el coeficiente de capa por medio de correlaciones, estas investigaciones han correlacionado las propiedades de los materiales de los que están compuesta las capas de la estructura del pavimento, los

estudios que existen son para materiales específicos del lugar en donde se realizó la investigación, como ejemplo podemos citar lo siguiente.

La guía AASHTO 93 proporciona nomogramas para evaluar el coeficiente de capa para los distintos elementos de la estructura del pavimento estos valores son obtenidos de ensayos realizados por la AASHO, en los estados de Illinois, Luisiana y Texas (fig. 3.40).

Variación en el coeficiente estructural de la capa de base estabilizada



(1) Escala derivada de los porcentajes obtenidos de las correlaciones de Illinois, Luisiana y Texas  
 (2) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)

Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO

Fig. 3. 40. Valores de coeficiente de capa presentados en la guía de diseño AASHTO 93.

El TRRL Laboratory Report 673 (Hodges, Rolt and Jones, 1975) proporciona una expresión para encontrar el coeficiente estructural de capa para capas de suelo cemento, adoptada por las normas de diseño chilenas, la cual será utilizada para determinar el coeficiente de capa en la investigación.

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

**r = Resistencia a la compresión cilíndrica en Mpa. (ASTM D-1633).**

## **Capítulo 4: 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.

### **4.1 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 inconcientemente 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.

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

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).

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

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.

$$\begin{aligned} & \sum (Y_i - Y_R)^2 \\ & \sum (Y_i - (a + bx))^2 \\ & \sum (Y_i - a - bx)^2 \end{aligned}$$

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  $\frac{dG}{da}$  y  $\frac{dG}{db}$  obteniéndose el siguiente sistema de

ecuaciones:

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

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.

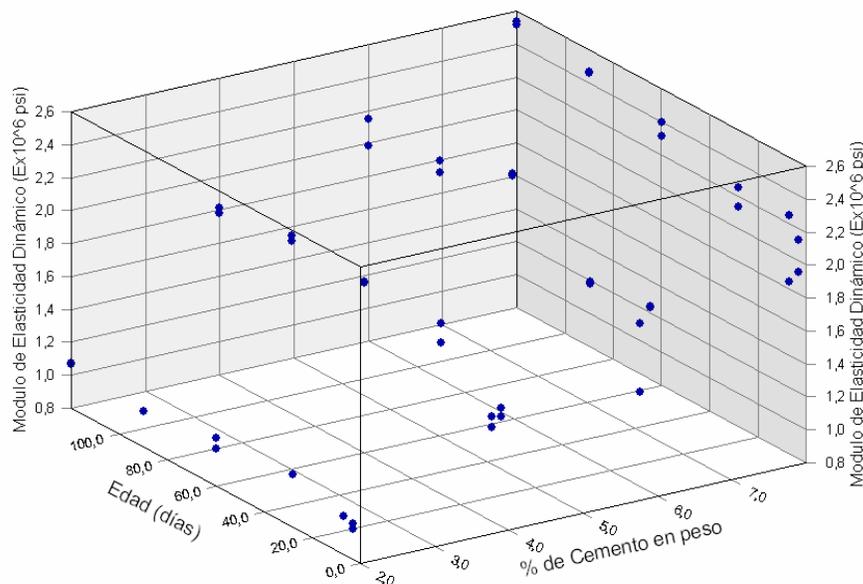
En la investigación el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a la compresión simple fueron determinados mediante procedimientos de laboratorio, por lo tanto son variables respuesta o variables dependientes. Según lo observado, los resultados obtenidos están en función de la edad del espécimen y al mismo tiempo están en función del porcentaje de cemento en peso contenido en la mezcla de suelo cemento, ambas variables fueron especificadas previo 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 algunos programas para estadística.

## 4.2 Ajuste de datos obtenidos de modulo de elasticidad dinámico.

En la siguientes figuras se muestran los diagramas de dispersión para los resultados obtenidos de modulo de elasticidad dinámico, para las mezclas de suelo cemento utilizadas en la investigación.

### 4.2.1 Resultados utilizando mezclas con cemento ASTM C-91 Tipo M.



**Fig. 4. 1 Grafico: Modulo de Elasticidad Dinámico-Edad-% de Cemento, para S/C (Cemento ASTM C-91 tipo M).**

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 modulo de elasticidad dinámico.

Para la mezcla de suelo cemento con cemento **ASTM C-91 tipo M**, el modelo matemático encontrado que mejor se ajusto al diagrama de dispersión fue el siguiente:

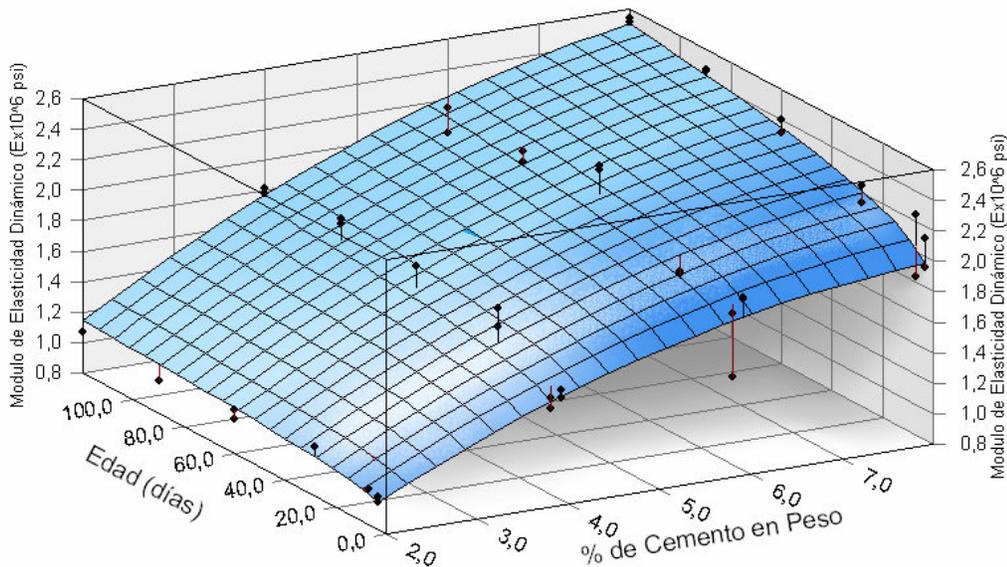
$$Y = ax_1^b x_2^c + dx_1^2 + ex_1 + f$$

Donde: Y= Modulo de Elasticidad Dinámico (Ex10<sup>6</sup> psi).

X<sub>1</sub>= % de cemento en peso.

X<sub>2</sub>= Edad (días)

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



**Fig. 4. 2** Superficie de ajuste generada por el modelo  $Y = ax_1^b x_2^c + dx_1^2 + ex_1 + f$

El ajuste con el modelo anterior generó un coeficiente de determinación múltiple ( $R^2$ ) = 0.93, es decir se obtuvo un porcentaje de imprecisión en el ajuste de 7% y los valores de las constantes que se muestran en la siguiente tabla:

a	0.029
b	0,872
c	0,310
d	-0.021
e	0,341
f	0,306

Los valores ajustados de modulo de elasticidad se resumen en la siguiente tabla:

% de Cemento	Edad (días)					
	3	7	28	60	90	120
2	0,981	1,004	1,057	1,097	1,123	1,143
4	1,478	1,519	1,616	1,689	1,736	1,773
6	1,803	1,862	2,000	2,105	2,172	2,225
8	1,960	2,036	2,213	2,348	2,434	2,502

**Tabla 4. 1 Módulos de Elasticidad dinámicos ajustados, para mezclas de s-c. (cemento ASTM C-91 tipo M).**

#### 4.2.2 Resultados utilizando mezclas con cemento ASTM C-1157 Tipo HE.

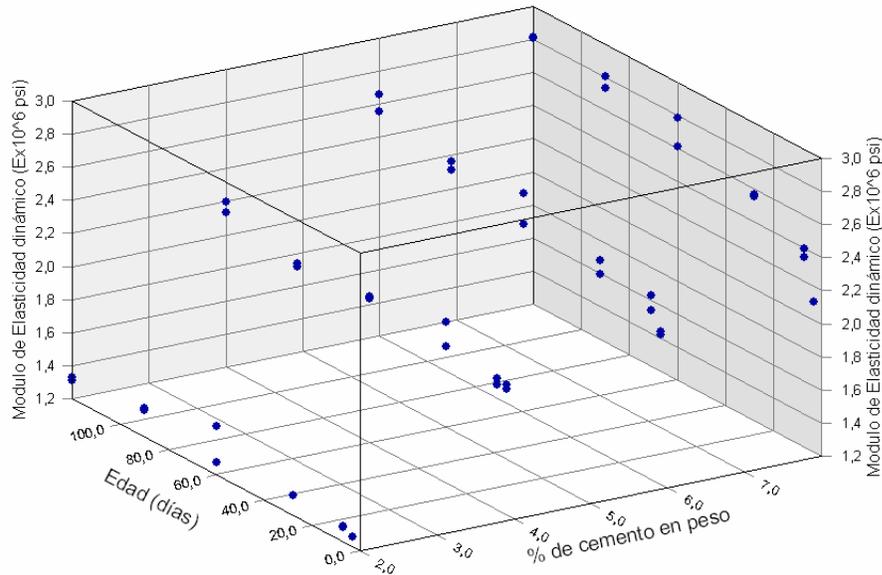


Fig. 4. 3 Grafico: Modulo de Elasticidad Dinámico-Edad-% de Cemento, para S/C (Cemento ASTM C-1157 tipo HE).

Siguiendo el procedimiento descrito en el numeral anterior para la mezcla de suelo cemento utilizando cemento **ASTM C-1157 tipo HE**, el modelo matemático encontrado que mejor se ajusto al diagrama de dispersión fue el siguiente:

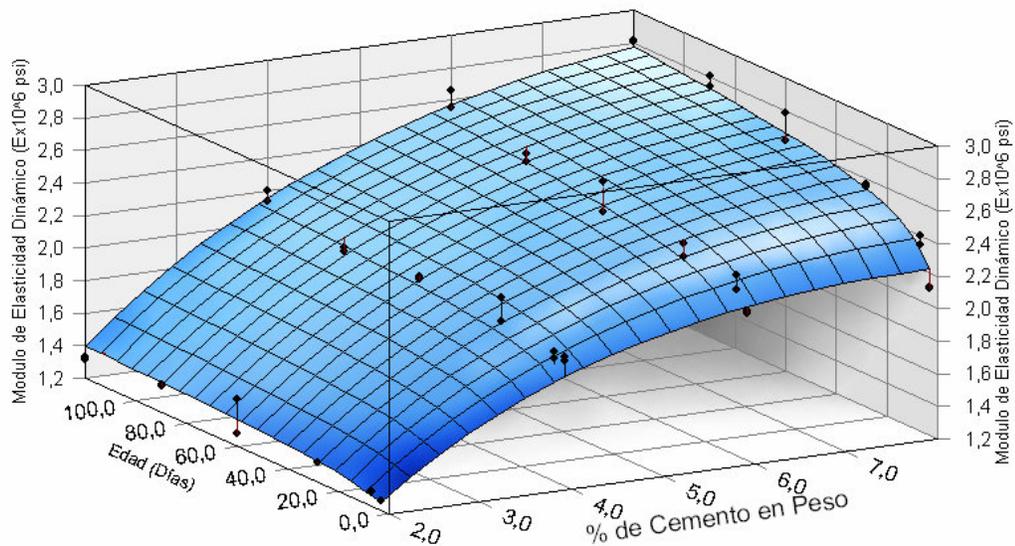
$$Y = ax_1^b x_2^c + dx_2^2 + ex_1 + f$$

Donde: Y= Modulo de Elasticidad Dinámico (Ex10<sup>6</sup> psi).

X<sub>1</sub>= % de cemento en peso.

X<sub>2</sub>= Edad (días)

Dicho modelo generó la superficie de ajuste que se muestra a continuación:



**Fig. 4.4 Superficie de ajuste generada por el modelo  $Y = ax_1^b x_2^c + dx_2^2 + ex_1 + f$**

Se obtuvo un coeficiente de determinación múltiple ( $R^2$ ) = 0.98 y las constantes que se muestran a continuación:

a	3,364
b	0,872
c	0.0074
d	0,255
e	-2,270
f	-0,445

Los valores ajustados de modulo de elasticidad se resumen en la siguiente tabla:

% de Cemento	Edad (días)					
	3	7	28	60	90	120
2	1,251	1,268	1,328	1,363	1,383	1,396
4	1,866	1,915	2,029	2,095	2,130	2,155
6	2,146	2,226	2,390	2,484	2,534	2,570
8	2,221	2,330	2,543	2,663	2,728	2,774

**Tabla 4. 2 Módulos de Elasticidad dinámicos ajustados, para mezclas de s-c. (cemento ASTM C-1157 tipo HE).**

### 4.3 Ajuste de datos obtenidos de Resistencia a la compresión.

Para los resultados de resistencia a la compresión, se siguió el mismo procedimiento de ajuste. A continuación se muestran los diagramas de dispersión de las diferentes mezclas de suelo cemento:

#### 4.3.1 Resultados utilizando mezclas con cemento ASTM C-91 Tipo M.

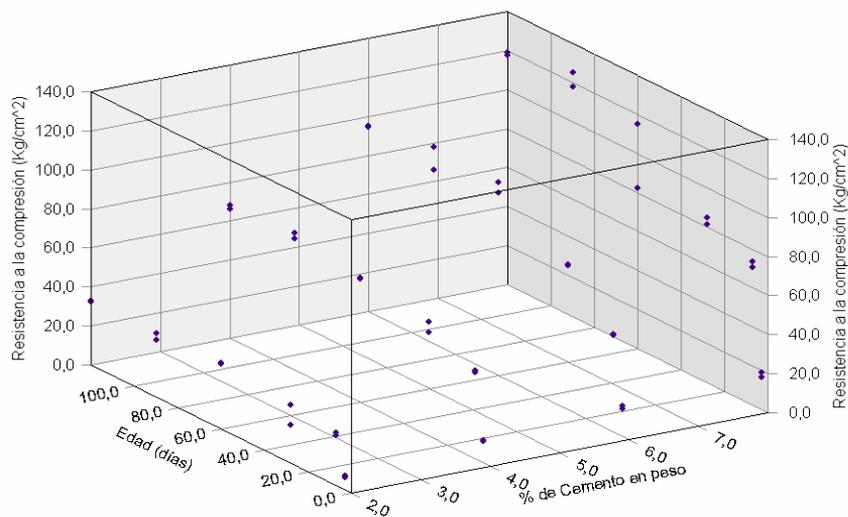


Fig. 4. 5 Grafico: Resistencia a la Compresión-Edad-% de Cemento, para S/C (Cemento ASTM C-91 tipo M).

Siguiendo el mismo procedimiento utilizado para los módulos de elasticidad dinámicos, se encontraron los siguientes modelos para Resistencia a la compresión:

Para las mezclas de suelo cemento, donde se utilizo cemento C-91 tipo M, se encontró el siguiente modelo:

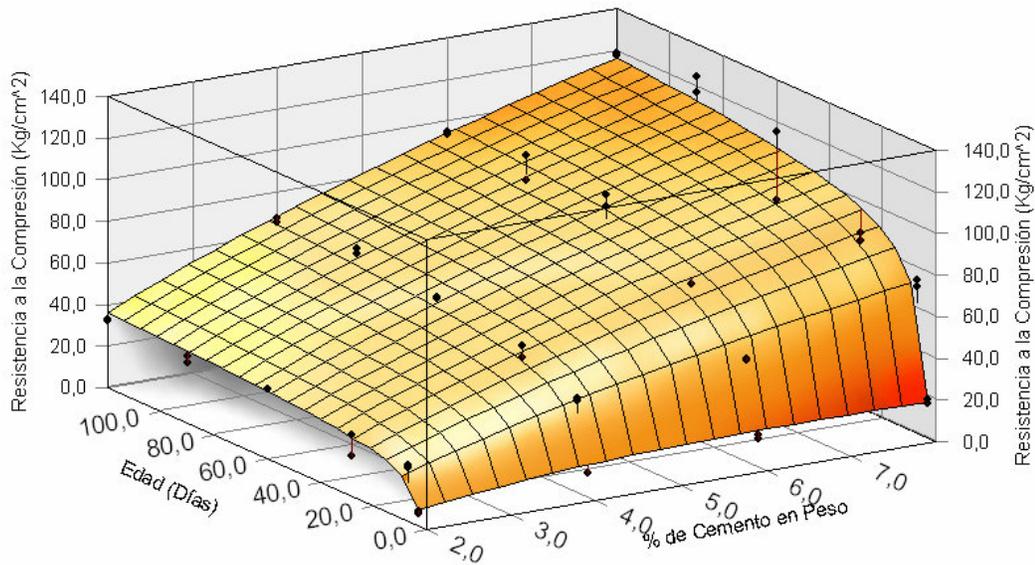
$$Y = ax_1^b x_2^c + \frac{dx_1}{x_2} + \frac{e}{x_2} + f$$

Donde: Y= Resistencia a la Compresión (Kg/cm<sup>2</sup>).

$X_1$ = % de cemento en peso.

$X_2$ = Edad (días)

El modelo encontrado, generó la siguiente superficie de ajuste:



**Fig. 4. 6 Superficie de ajuste generada por el modelo  $Y = ax_1^b x_2^c + dx_1/x_2 + e/x_2 + f$**

Se obtuvo un coeficiente de determinación múltiple ( $R^2$ ) = 0.96 y las constantes que se muestran a continuación:

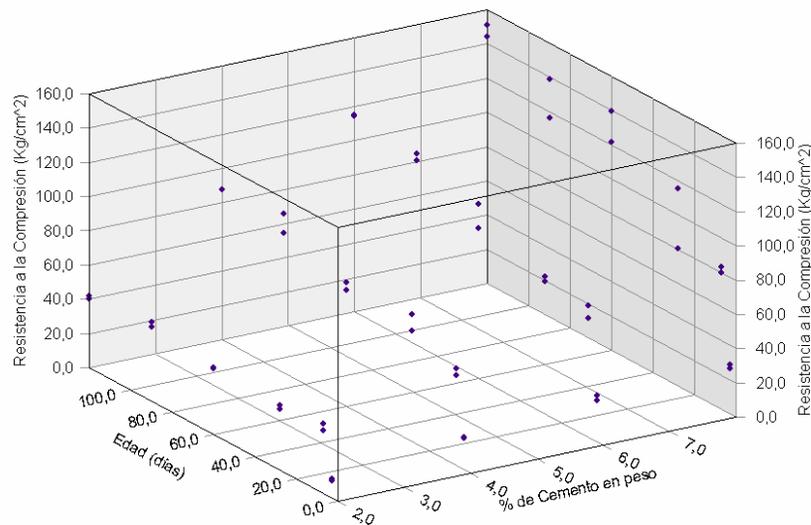
a	33,170
b	0,565
c	0.071
d	-26,588
e	14,163
f	-32,482

Los valores ajustados de Resistencia a la Compresión se resumen en la siguiente tabla:

% de Cemento	Edad (días)					
	3	7	28	60	90	120
2	7,573	18,297	28,312	32,516	34,652	36,156
4	15,288	37,720	56,230	63,106	66,458	68,779
6	17,776	51,592	78,021	87,230	91,608	94,608
8	17,476	62,502	96,545	107,903	113,207	116,813

**Tabla 4. 3 Valores de Resistencia a la compresión ajustados, para mezclas de s-c. (cemento ASTM C-91 tipo M).**

### 4.3.2 Resultados utilizando mezclas con cemento ASTM C-1157 Tipo HE.



**Fig. 4. 1 Grafico: Resistencia a la Compresión-Edad-% de Cemento, para S/C (Cemento ASTM C-1157 tipo HE).**

Para las mezclas de suelo cemento, donde se utilizo cemento C-1157 tipo HE, se encontró el siguiente modelo:

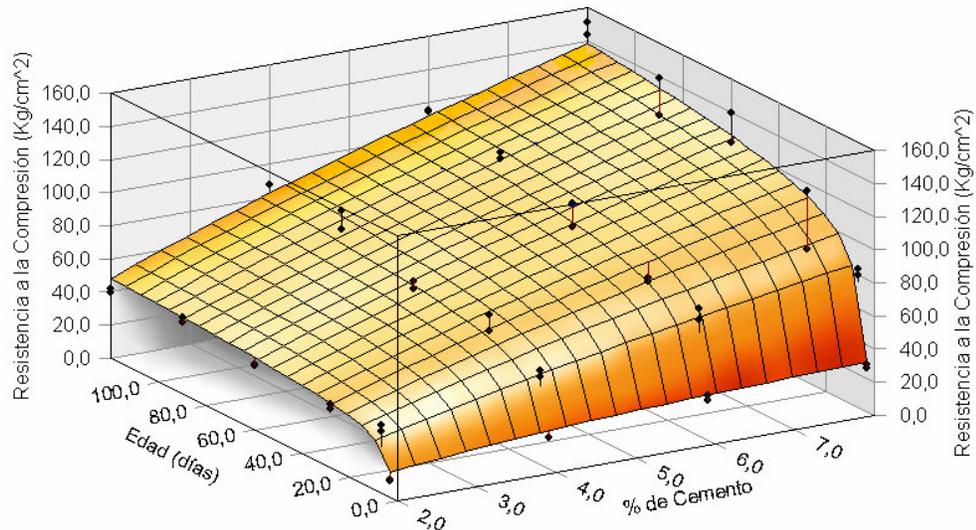
$$Y = ax_1^b x_2^c + \frac{dx_1}{x_2} + \frac{e}{x_2} + f$$

Donde: Y= Resistencia a la Compresión (Kg/cm<sup>2</sup>).

X<sub>1</sub>= % de cemento en peso.

$X_2 = \text{Edad (días)}$

El modelo encontrado, generó la siguiente superficie de ajuste:



**Fig. 4. 8 Superficie de ajuste generada por el modelo  $Y = ax_1^b x_2^c + dx_1/x_2 + e/x_2 + f$**

Se obtuvo un coeficiente de determinación múltiple ( $R^2$ ) = 0.94 y las constantes que se muestran a continuación:

a	21,157
b	0,692
c	0.106
d	-23,617
e	2,554
f	-8.398

Los valores ajustados de Resistencia a la Compresión se resumen en la siguiente tabla:

% de Cemento	Edad (días)					
	3	7	28	60	90	120
2	15,107	27,212	38,619	43,545	46,098	47,918
4	23,023	46,340	66,887	75,222	79,458	82,455
6	27,399	61,596	90,673	102,043	107,748	111,765
8	29,773	74,663	111,925	126,117	133,172	138,121

**Tabla 4. 4 Valores de Resistencia a la compresión ajustados, para mezclas de s-c. (cemento ASTM C-1157 tipo HE).**

## 4.4 Correlación.

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 cual 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.

### 4.4.1 Correlación entre el modulo de elasticidad y Resistencia a la Compresión.

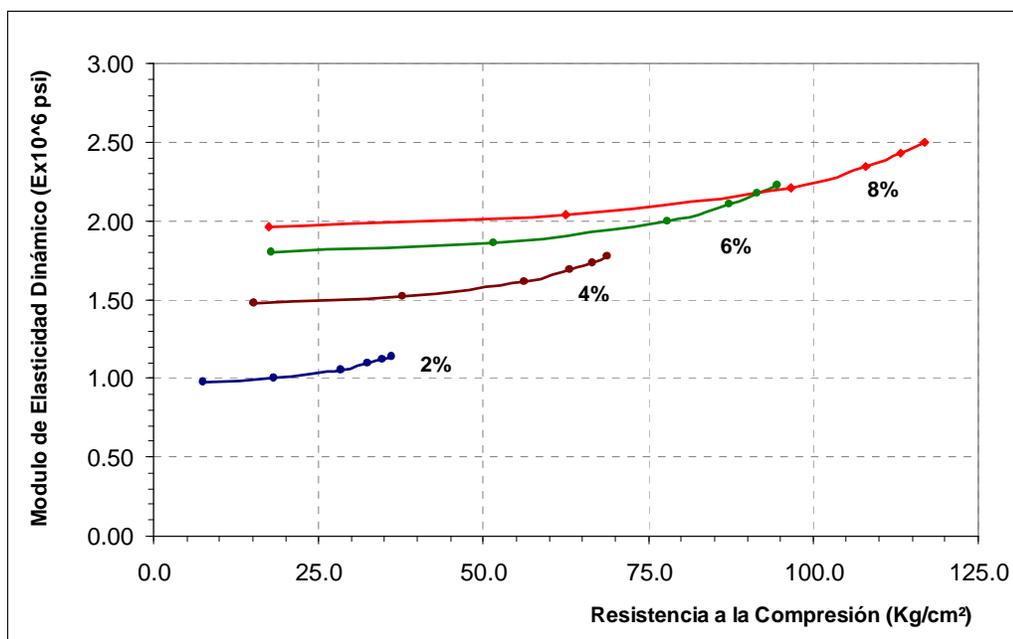


Fig. 4. 9 Correlación entre Modulo de elasticidad dinámico y resistencia a la compresión para suelo cemento (cemento ASTM C-91 tipo M).

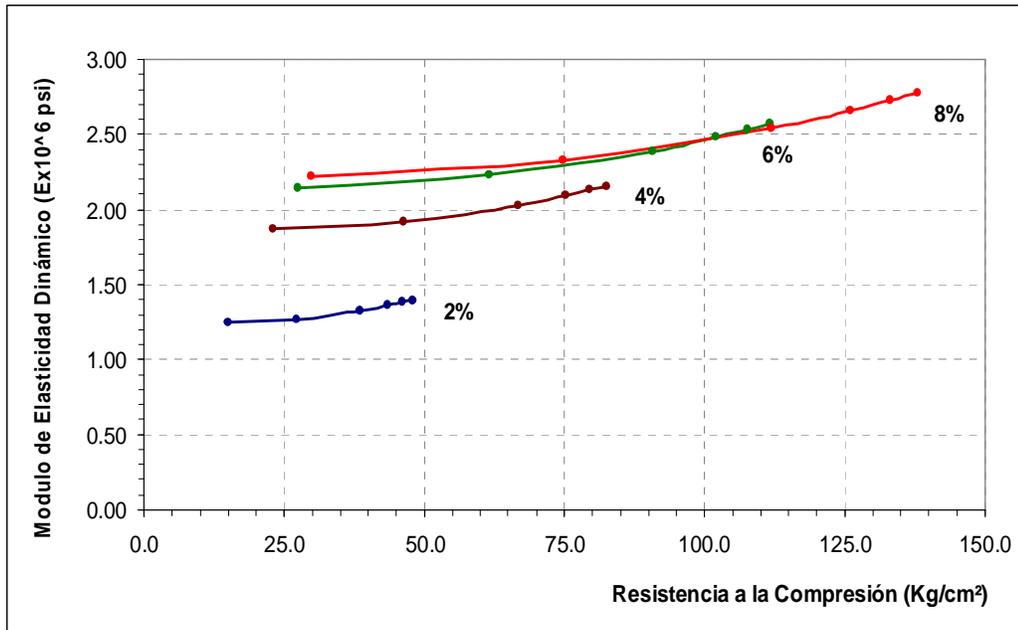


Fig. 4. 10 Correlación entre Módulo de elasticidad dinámico y resistencia a la compresión para suelo cemento (cemento ASTM C-1157 tipo HE).

De los gráficos se puede concluir que el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a la compresión guardan una relación dependiente del porcentaje de cemento, que tiende a estabilizarse a medida aumenta el porcentaje de cemento, como se observa en las curvas para 6% y 8%, por lo tanto, para este caso no es factible buscar una expresión matemática que relacione el módulo de elasticidad dinámico con la resistencia a la compresión, pero se pueden utilizar los gráficos para encontrar los módulos de elasticidad correspondientes a resistencias y porcentajes de cemento específicos.

#### 4.4.2 Coeficiente de capa.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el coeficiente de capa se obtuvo utilizando la siguiente expresión:

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

donde:

$r$  = Resistencia a la compresión cilíndrica en Mpa. (ASTM D-1633).

A continuación se muestran los valores de coeficiente de capa para las diferentes mezclas de suelo-cemento investigadas:

	% de Cemento	Edad (días)					
		3	7	28	60	90	120
s-c, cemento ASTM C-91 tipo M.	2	0,103	0,141	0,175	0,189	0,196	0,201
	4	0,131	0,206	0,261	0,280	0,289	0,295
	6	0,140	0,248	0,319	0,341	0,351	0,357
	8	0,139	0,278	0,361	0,385	0,395	0,401
s-c, cemento ASTM C-1157 tipo HE.	2	0,130	0,172	0,209	0,224	0,231	0,237
	4	0,158	0,232	0,290	0,312	0,322	0,329
	6	0,172	0,276	0,348	0,373	0,384	0,392
	8	0,180	0,310	0,392	0,417	0,429	0,436

Tabla 4.5 Valores de Coeficiente de Capa para las mezclas de suelo cemento investigadas.

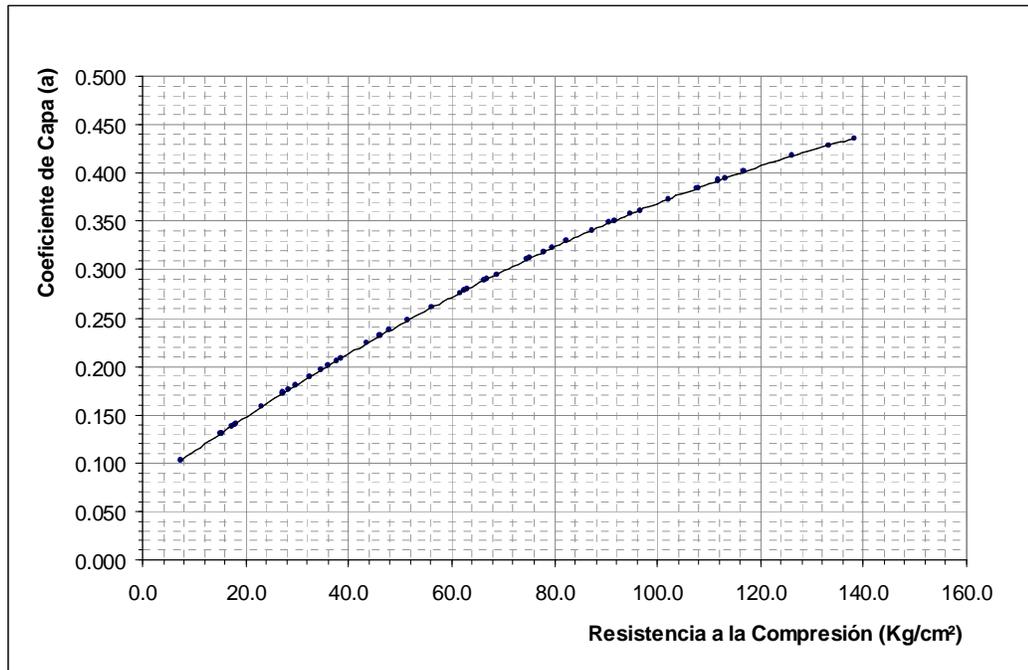


Fig. 4.11 Correlación entre coeficiente de capa y resistencia a la compresión para suelo cemento.

Aunque la relación entre coeficiente de capa y resistencia a la compresión no es una correlación elaborada en nuestra investigación, porque el coeficiente de capa fue obtenido a partir de la resistencia a la compresión (por medio de la expresión del TRRL), se puede tener la relación de forma gráfica, ya que a veces es más práctico leer un gráfico que realizar un cálculo matemático, además a partir del gráfico es posible encontrar una expresión equivalente en unidades de uso común en nuestro medio (unidades del Sistema Internacional) .

Los valores de coeficiente de capa fueron calculados a partir de los valores de resistencia a la compresión en Mpa (por medio de la fórmula del TRRL), al relacionarlos se puede obtener una expresión en la cual es posible encontrar el coeficiente de capa a partir de la resistencia a la compresión en Kg/cm<sup>2</sup>, esta expresión es independiente del tipo de cemento utilizado, ya que solo depende de la resistencia a la compresión.

$$a = -8 \times 10^{-6} r^2 + 0.0038 r + 0.0075$$

Donde:  $a$ : Coeficiente de capa (1/cm).

$r$ : Resistencia a la compresión simple (Kg/cm<sup>2</sup>).

El aporte de esta expresión respecto a la del TRRL radica únicamente en las unidades de las variables (coeficiente de capa y resistencia a la compresión).

#### 4.4.3 Correlación entre el módulo de elasticidad y coeficiente de capa.

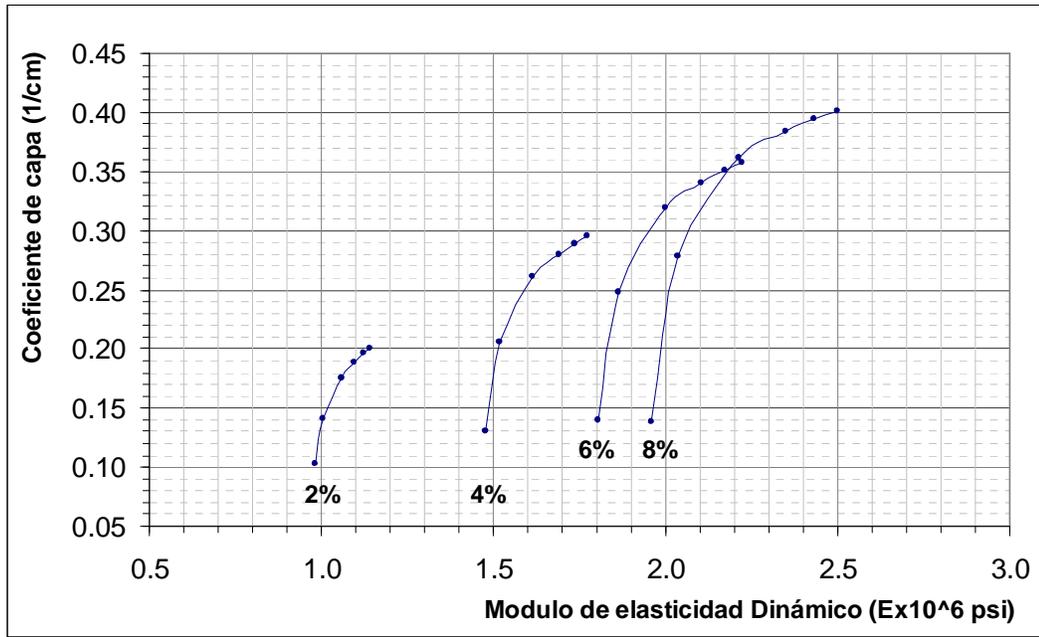


Fig. 4. 12 Correlación entre Módulo de elasticidad dinámico y coeficiente de capa para suelo cemento (cemento ASTM C-91 tipo M).

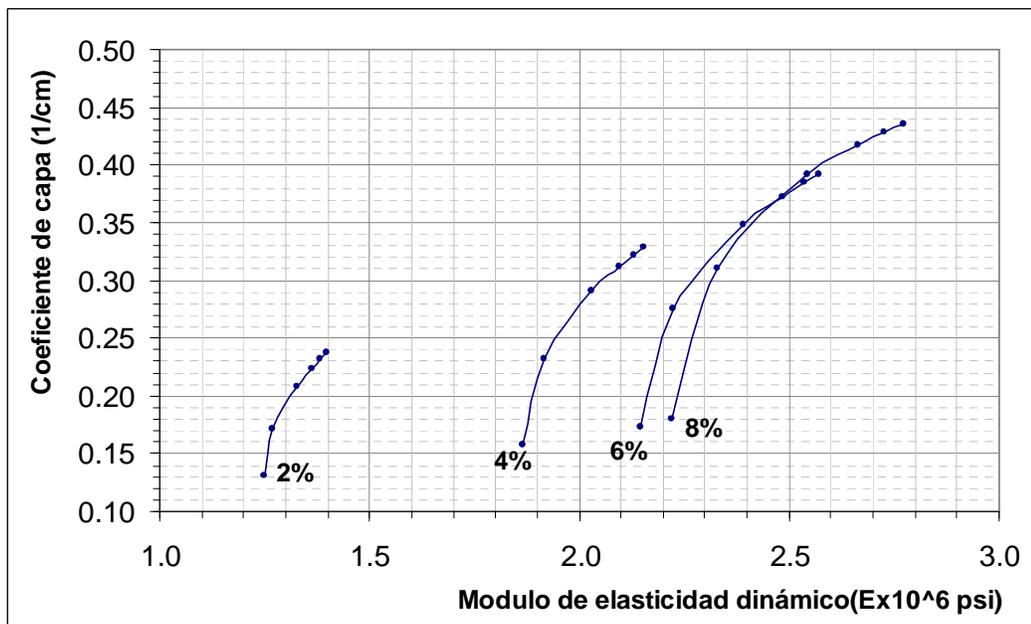


Fig. 4. 13 Correlación entre Módulo de elasticidad dinámico y coeficiente de capa para suelo cemento (cemento ASTM C-1157 tipo HE).

#### 4.5 RESUMEN DE RESULTADOS.

- Los modelos matemáticos que describen el comportamiento de la resistencia a la compresión y el modulo de elasticidad al relacionarlos con el porcentaje de cemento y las diferentes edades de ensayo se muestran a continuación:

Mezcla de suelocemento (cemento ASTM C-91 tipo M)	
Modulo de Elasticidad	$\mu_D = 0.029c^{0.872}e^{0.31} - 0.021c^2 + 0.341c + 0.306$
Resistencia a la compresión	$R_C = 33.17c^{0.565}e^{0.071} - \frac{26.588c}{e} + \frac{14.163}{e} - 32.482$

Mezcla de suelocemento (cemento ASTM C-1157 tipo HE)	
Modulo de Elasticidad	$\mu_D = 3.364c^{0.872}e^{0.007} + 0.255e^2 - 2.27c - 0.445$
Resistencia a la compresión	$R_C = 21.57c^{0.692}e^{0.106} - \frac{23.617c}{e} + \frac{2.554}{e} - 8.398$

Donde:

- $\mu_D$ : Módulo de elasticidad dinámico (Ex10<sup>6</sup> psi).
- $R_C$ : Resistencia a la compresión (Kg/cm<sup>2</sup>).
- $c$ : % de cemento en peso (número entero).
- $e$ : edad (días).

Valores ajustados de Modulo de Elasticidad Dinámico (Ex10<sup>6</sup> psi)

	% de Cemento	Edad (días)					
		3	7	28	60	90	120
s-c, cemento ASTM C-91 tipo M.	2	0,981	1,004	1,057	1,097	1,123	1,143
	4	1,478	1,519	1,616	1,689	1,736	1,773
	6	1,803	1,862	2,000	2,105	2,172	2,225
	8	1,960	2,036	2,213	2,348	2,434	2,502
s-c, cemento ASTM C-1157 tipo HE.	2	1,251	1,268	1,328	1,363	1,383	1,396
	4	1,866	1,915	2,029	2,095	2,130	2,155
	6	2,146	2,226	2,390	2,484	2,534	2,570
	8	2,221	2,330	2,543	2,663	2,728	2,774

**Tabla 4.6 Valores ajustados de Modulo de Elasticidad Dinámico.**

Valores ajustados de Resistencia a la compresión (Kg/cm<sup>2</sup>):

	% de Cemento	Edad (días)					
		3	7	28	60	90	120
s-c, cemento ASTM C-91 tipo M.	2	7,573	18,297	28,312	32,516	34,652	36,156
	4	15,288	37,720	56,230	63,106	66,458	68,779
	6	17,776	51,592	78,021	87,230	91,608	94,608
	8	17,476	62,502	96,545	107,903	113,207	116,813
s-c, cemento ASTM C-1157 tipo HE.	2	15,107	27,212	38,619	43,545	46,098	47,918
	4	23,023	46,340	66,887	75,222	79,458	82,455
	6	27,399	61,596	90,673	102,043	107,748	111,765
	8	29,773	74,663	111,925	126,117	133,172	138,121

**Tabla 4.7 Valores ajustados de Resistencia a la Compresión.**

Si se desean conocer valores de modulo de elasticidad dinámico o resistencia a la compresión 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.

- A continuación se presentan de forma gráfica el resumen de los resultados obtenidos de resistencia a la compresión y modulo de elasticidad dinámico.

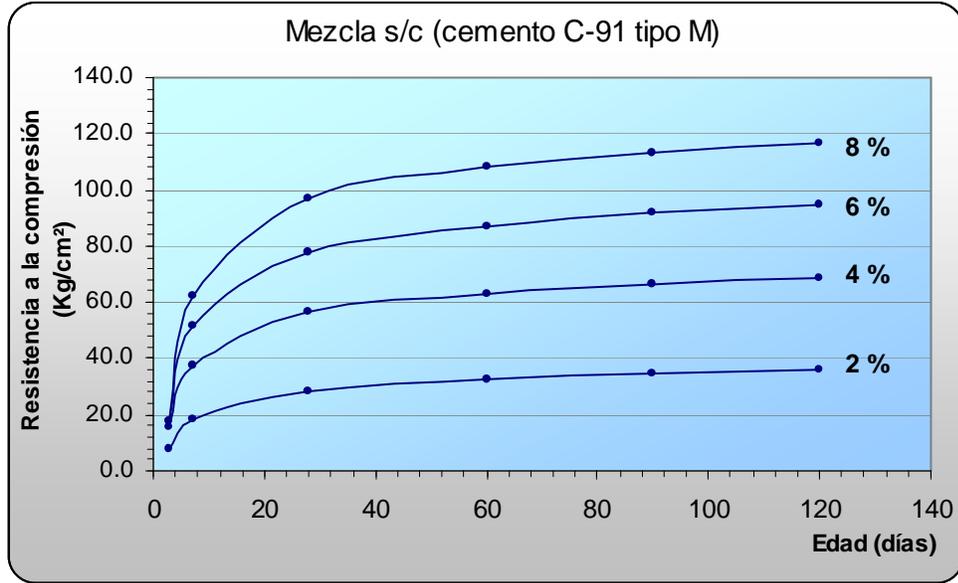


Fig. 4. 14 Comportamiento de la resistencia a la compresión simple en el tiempo para diferentes porcentajes de cemento (cimento ASTM C-91 tipo M).

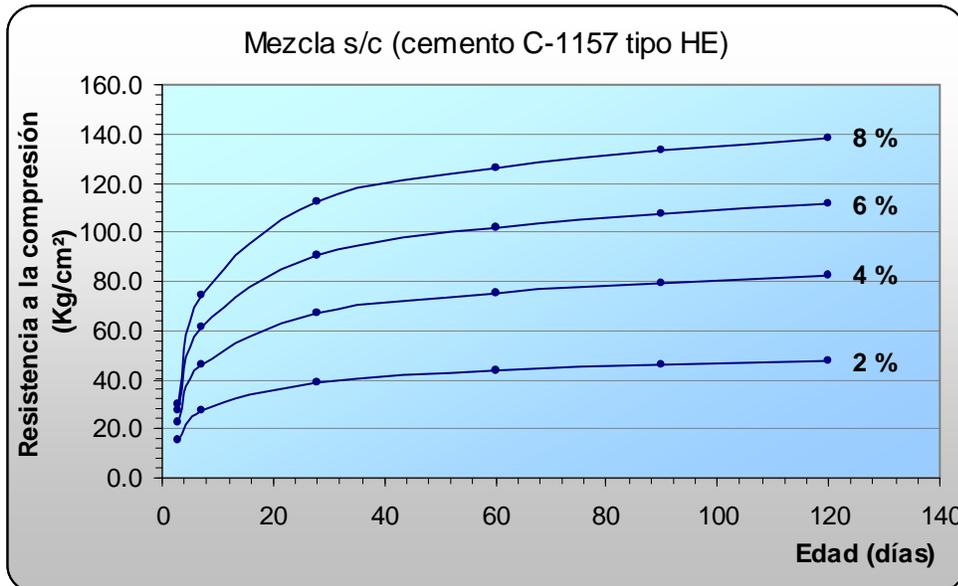


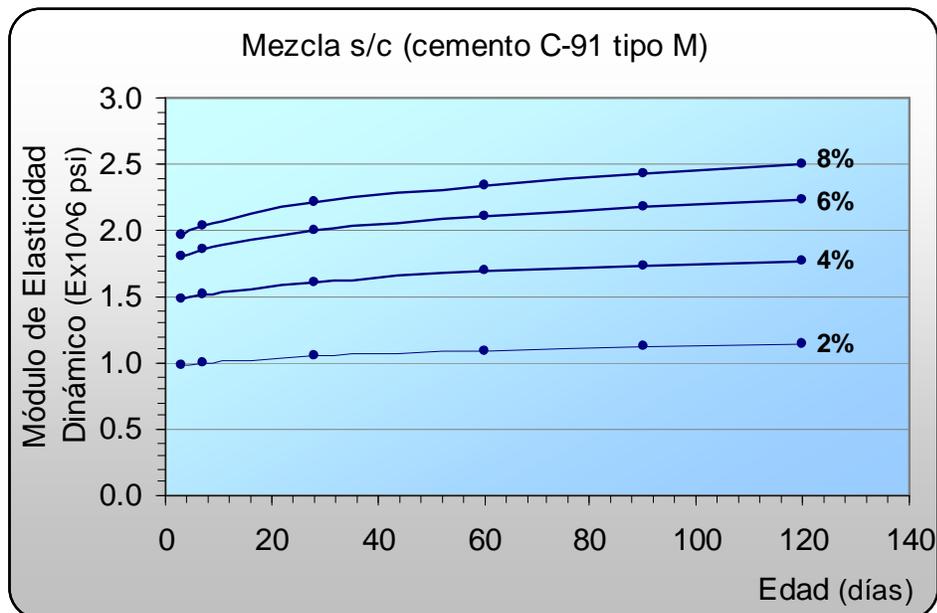
Fig. 4. 15 Comportamiento de la resistencia a la compresión simple en el tiempo para diferentes porcentajes de cemento (cimento ASTM C-1157 tipo HE).

De las graficas anteriores se puede observar que el cemento ASTM C-1157 tipo HE, presenta mayor desempeño en resistencia respecto al cemento ASTM C-91 tipo M, estas variaciones se resumen en la siguiente tabla en donde se presenta la variación del cemento ASTM C-1157 tipo HE respecto del cemento ASTM C-91 tipo M.

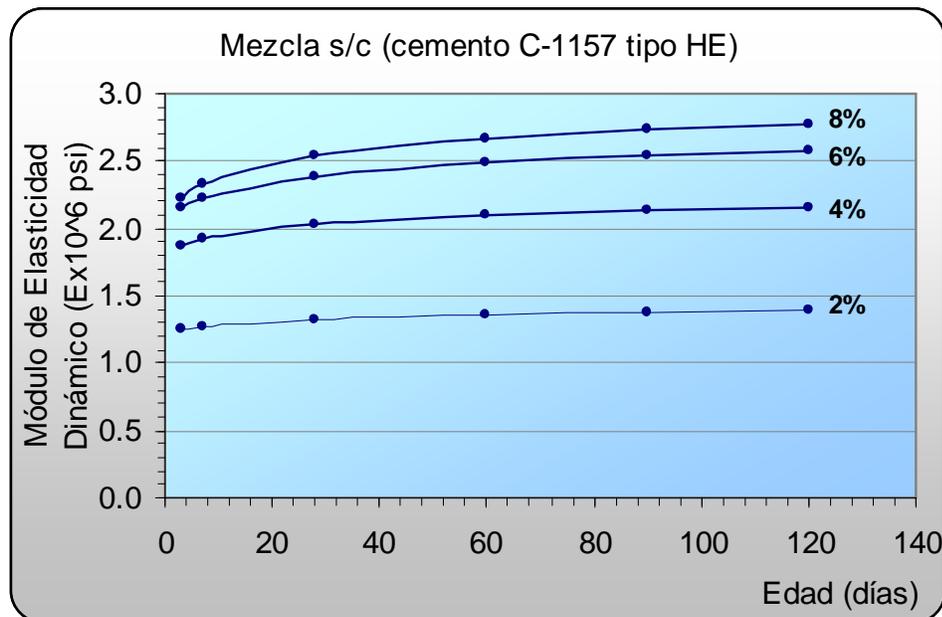
% CEMENTO	EIDADES DE ENSAYO					
	3	7	28	60	90	120
2	50%	33%	27%	25%	25%	25%
4	34%	19%	16%	16%	16%	17%
6	35%	16%	14%	15%	15%	15%
8	41%	16%	14%	14%	15%	15%

**Tabla 4.8 Porcentaje de variación de mezclas de suelocemento con cemento ASTM C-1157 tipo HE, respecto a mezclas con cemento ASTM C-91 tipo M.**

De la tabla 4.6 se puede ver como él porcentajes de variación de resistencia son altos a edades tempranas y estos tienden a disminuir a medida el tiempo avanza y el porcentaje de cemento aumenta.



**Fig. 4. 16 Comportamiento del modulo de elasticidad dinámico en el tiempo para diferentes porcentajes de cemento (cemento ASTM C-91 tipo M).**



**Fig. 4. 17 Comportamiento del modulo de elasticidad dinámico en el tiempo para diferentes porcentajes de cemento (cimento ASTM C-1157 tipo HE).**

De las graficas anteriores se puede observar que el cemento ASTM C-1157 tipo HE, presenta mayor desempeño para el modulo de elasticidad dinámico comparado con el cemento ASTM C-91 tipo M, estas variaciones se resumen en la siguiente tabla en donde se presenta la variación del cemento ASTM C-1157 tipo HE respecto del cemento ASTM C-91 tipo M.

% CEMENTO	EIDADES DE ENSAYO					
	3	7	28	60	90	120
2	22%	21%	20%	20%	19%	18%
4	21%	21%	20%	19%	18%	18%
6	16%	16%	16%	15%	14%	13%
8	12%	13%	13%	12%	11%	10%

**Tabla 4.9 Porcentaje de variación de mezclas de suelocemento con cemento ASTM C-1157 tipo HE, respecto a mezclas con cemento ASTM C-91 tipo M.**

De la tabla 4.7 se puede ver como los porcentajes de variación de modulo de elasticidad no varían significativamente con el tiempo pero se lo hacen a medida el porcentaje de cemento aumenta.

- A continuación se muestran los valores calculados de coeficiente de capa para las mezclas de suelocemento investigadas:

	% de Cemento	Edad (días)					
		3	7	28	60	90	120
s-c, cemento ASTM C-91 tipo M.	2	0,103	0,141	0,175	0,189	0,196	0,201
	4	0,131	0,206	0,261	0,280	0,289	0,295
	6	0,140	0,248	0,319	0,341	0,351	0,357
	8	0,139	0,278	0,361	0,385	0,395	0,401
s-c, cemento ASTM C-1157 tipo HE.	2	0,130	0,172	0,209	0,224	0,231	0,237
	4	0,158	0,232	0,290	0,312	0,322	0,329
	6	0,172	0,276	0,348	0,373	0,384	0,392
	8	0,180	0,310	0,392	0,417	0,429	0,436

**Tabla 4.10** Tabla resumen de valores de coeficiente de capa.

- Para comprender mejor la evolución del coeficiente de capa con el tiempo, se presentan las siguientes graficas:

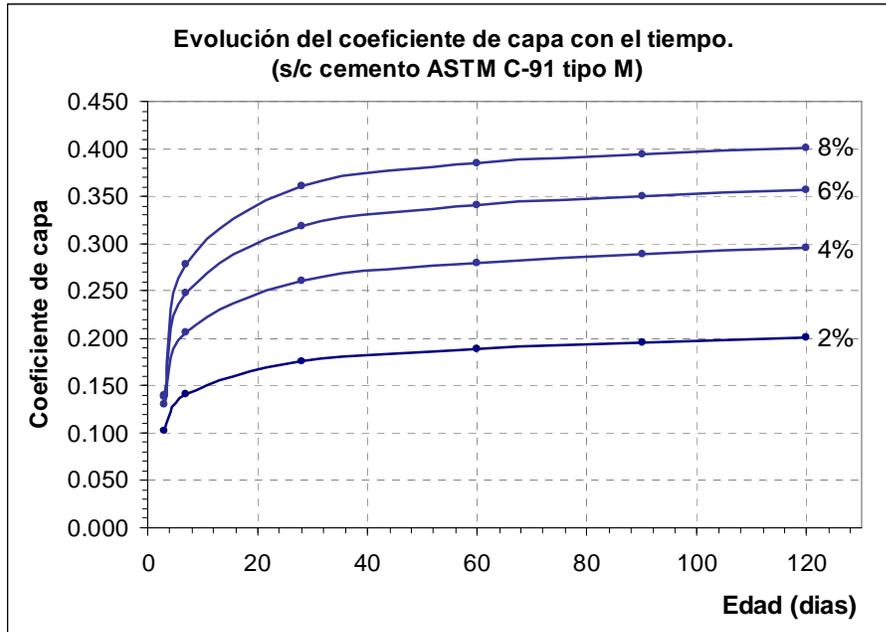


Fig. 4. 18 Evolución del Coeficiente estructural de capa con el tiempo para diferentes porcentajes de cemento (cemento ASTM C-91 tipo M).

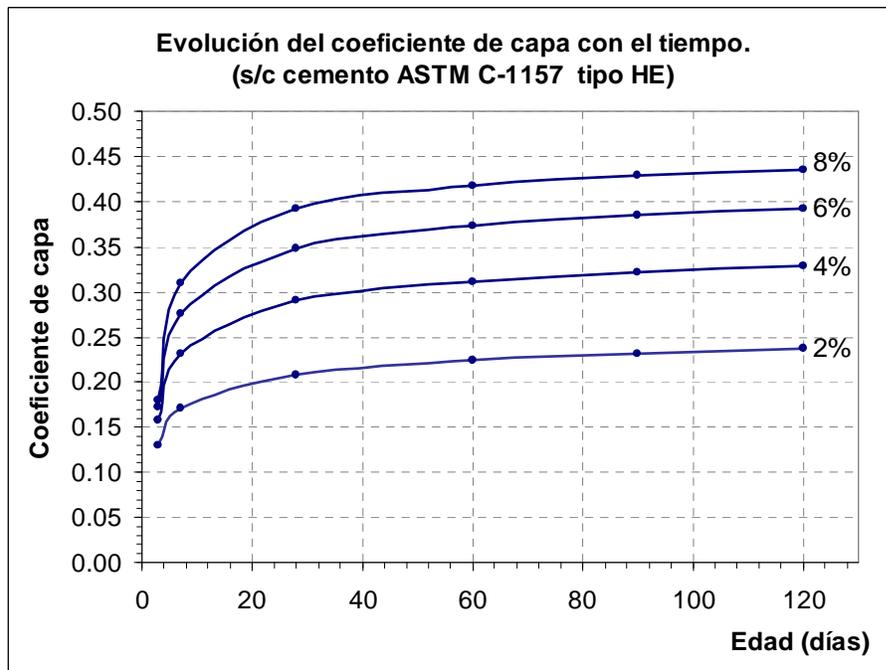


Fig. 4. 19 Evolución del Coeficiente estructural de capa con el tiempo para diferentes porcentajes de cemento (cemento ASTM C-1157 tipo HE).

Las graficas muestran como el coeficiente de capa aumenta con el tiempo y con la edad, este comportamiento lo presenta debido a que estos resultados son obtenidos a partir de la ecuación que relaciona directamente el coeficiente de capa con la resistencia a la compresión.

La expresión que relaciona al coeficiente de capa con la resistencia a la compresión se puede reescribir de forma tal que se utilicen unidades de uso común en nuestro medio, como se muestra a continuación:

$$a = -8 \times 10^{-6} r^2 + 0.0038 r + 0.0075$$

Donde:  $a$ : Coeficiente de capa (1/cm).

$r$ : Resistencia a la compresión simple (Kg/cm<sup>2</sup>).

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **5.1 CONCLUSIONES**

- Existen diferentes definiciones para suelo cemento, dependiendo de la institución que analiza la mezcla, por lo que para nuestro trabajo de graduación adoptamos una definición tomando en cuenta los aspectos que consideramos más importantes de cada uno de estos conceptos, la cual mostramos a continuación:

Suelo cemento, es una mezcla 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.

- 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, en nuestro país estos requerimientos son establecidos por el manual de la SIECA.
- De acuerdo a la investigación realizada podemos concluir que las capas de suelo cemento utilizadas como bases o subbases en pavimentos funcionan similares a las losas, teniendo en cuenta que su resistencia es menor. Esto permite mayor estabilidad y una distribución más uniforme de las cargas de tráfico hacia la

subrasante, este 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 comparado con lo que se necesitaría si se utilizara una capa de suelo granular sin estabilizar.

- De acuerdo con lo observado en la investigación se pudo determinar que cuando la energía de compactación es constante, la resistencia a la compresión y el modulo de elasticidad dinámico, son independientes de la densidad.
- Los resultados obtenidos son validos 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.
- A partir de los resultados obtenidos se concluye que las mezclas optimas (tanto técnica como económicamente) para las mezclas de suelo cemento investigadas, utilizando una arena limosa (SM) y cemento ASTM C 91 tipo M y ASTM C 1157 tipo HE, son de 2.5% y 2.0% de cemento en peso respectivamente; ya que cumplen con el requerimiento mínimo de tener una resistencia a la compresión de  $21 \text{ kg/cm}^2$  a los 7 días (requerimiento de SIECA, ACI 230.1R, PCA, INVIAS y AFP) y es el porcentaje de cemento mínimo con el que se alcanza dicha resistencia.
- La Resistencia a la compresión y el modulo de Elasticidad dinámico 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.

- Tomando como base la expresión que relaciona el coeficiente de capa con la resistencia a la compresión, podemos concluir que si el coeficiente de capa depende de la resistencia a la compresión, entonces el coeficiente de capa también depende de la edad, por lo tanto este aumenta con el tiempo.
- 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.
- Las mezclas de suelo cemento elaboradas con cemento ASTM C-91 tipo M, tienen un menor desempeño respecto a las mezclas elaboradas con cemento ASTM C-1157 tipo HE, esto no quiere decir que su utilización debe ser restringida, ya que se obtuvieron resultados satisfactorios tanto en resistencia a la compresión como de modulo de elasticidad dinámico, por lo que esto debe llevarnos a evaluar la posibilidad de su uso ya que ofrece ventajas, tanto técnicas como económicas y con un adecuado diseño se pueden obtener resultados satisfactorios.
- 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.

## 5.2 RECOMENDACIONES.

- Para que un suelo pueda tener mejores resultados para la realización de suelo cemento, la SIECA recomienda que tenga las siguientes características:

<b>EI SALVADOR (SIECA)</b>
<b>REQUISITOS GRANULOMETRICOS</b>
Material que pasa la malla N°4 (50 - 100%)
Material que pasa la malla N°200 (5 - 35%)
Tamaño máximo de las partículas de suelo 50 mm (2")
<b>REQUISITOS DE PLASTICIDAD</b>
Limite Liquido (LL < 40% )
Índice de Plasticidad (IP < 8%)

- Debido a que en la presente investigación no se contó con un método para determinar el número estructural (SN) por pruebas de laboratorio y a partir de este calcular el coeficiente estructural de capa, es recomendable realizar investigaciones de campo, construyendo tramos de prueba en los que se tomen en cuenta las variables con las que se han trabajado en esta investigación: tipos de cemento, energía de compactación, porcentajes de cemento utilizados y edades de prueba, ya que por medio de equipos que puedan obtener el número estructural de las diferentes capas que conforman una estructura de pavimento, se pueden calcular indirectamente los coeficientes de capa y así poder tener correlaciones propias y darle seguimiento al estudio del coeficiente de capa.

- Es necesario plantear nuevas investigaciones que incluyan otros tipos de cemento y suelos disponibles en el país para aprovechar de la mejor manera posible los recursos disponibles en cada proyecto y los beneficios que nos proporciona el suelo cemento.
- 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.

## **BIBLIOGRAFIA.**

- Tecnología y aplicaciones del suelo cemento.  
Agustín Antonio Castro, José Samuel Solórzano.  
Trabajo de Graduación, Universidad de El Salvador (UES), San Salvador 1970.
- El suelo-cemento aplicado a la construcción de carreteras.  
Ballardo Rolando Arriaza E., Francisco Petronio Arriaza G., Rafael Rivas Blanco.  
Trabajo de Graduación, Universidad de El Salvador (UES), San Salvador 1970.
- Dosificación de mezclas de suelo-cemento.  
Notas técnicas, Instituto Colombiano de Productores de Cemento.  
Medellín, Colombia, 1983.
- AASHTO guide for design of pavement structures-1993.  
Volumen II-12 y II-15.  
American Association of State Highway and Transportation Officials.
- SUELO-CEMENTO, sus usos, propiedades y aplicaciones.  
M. en I. Eduardo de la Fuente Lavalle.  
Instituto mexicano del cemento y del concreto, México, 1995.
- Analisis de suelo-cemento compactado.  
Marcos Barahona Melendez.  
Trabajo de Graduación, Universidad de El Salvador (UES), San Salvador, 1996.
- Practica recomendable para la evaluación de los resultados de las pruebas de resistencia del concreto (ACI 214-97).  
American Concrete Institute.
- Comportamiento del cemento como estabilizador de distintos suelos.  
Aquino Cerna, Mario Edgardo.  
Trabajo de Graduación, Universidad de El Salvador (UES), San Salvador, 1999.
- Diseño de pavimentos AASHTO-97.  
Instituto boliviano del cemento y el hormigón.  
Bolivia, agosto de 2000.
- Primer simposio internacional sobre estabilización de explanadas y reciclado in situ de firmes con cemento.  
Salamanca, España. Octubre de 2001.

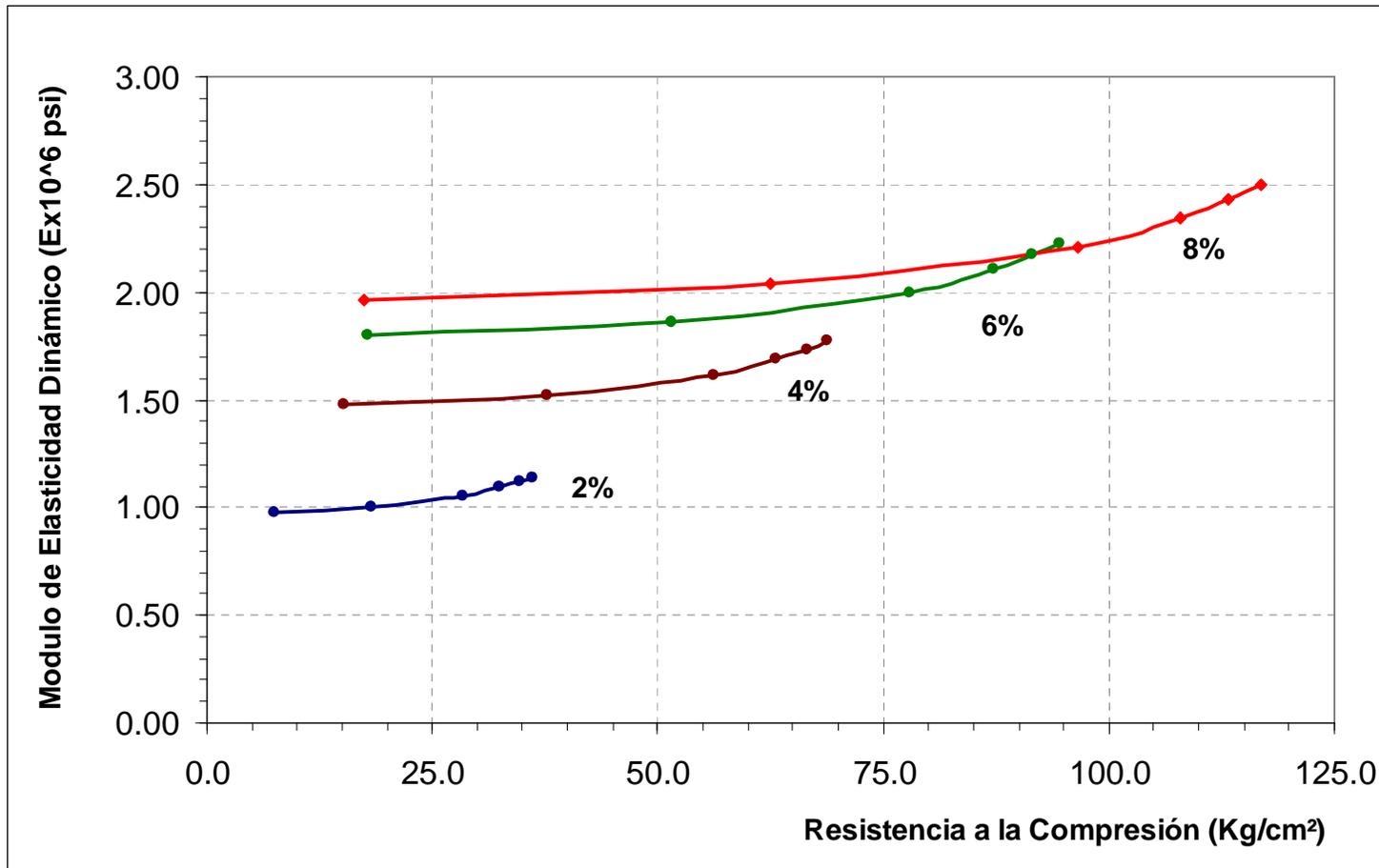
- Guía para el uso del método de diseño de estructuras de pavimentos nuevos según método AASHTO 2002.  
Jorge Alexander Figueroa Gómez.  
Trabajo de Graduación, Universidad de El Salvador (UES), San Salvador, 2005.
- Pavement Analisis and Design.  
Yang H. Huang, University of Kentucky.  
Prentice Hall.
- Guía para el uso del método de diseño de estructuras de pavimentos nuevos según método AASHTO 2002.  
Jorge Alexander Figueroa Gómez.  
Trabajo de Graduación, Universidad de El Salvador (UES), San Salvador, 2005.
- Propuesta para un manual de laboratorio de mecánica de suelos conforme a la norma ASTM 2003.  
Sandra Lisseth García Trejo, María Ofelia Ramírez López.  
Trabajo de Graduación, Universidad de El Salvador (UES), San Salvador, 2006.
- Soil-cement laboratory hand book.  
Portland Cement Association.
- Suelo-cemento base durable para las vías de hoy.  
Ing. Walter Mejía Hernández.  
ARGOS, Colombia.
- Revista ISCYC No. 42.  
Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto.  
San Salvador, El Salvador 2007.
- Revista ISCYC No. 43.  
Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto.  
San Salvador, El Salvador 2007.
- El estado del arte del suelo cemento.  
Comité ACI 230-1R.  
American Concrete Institute.
- El estado del arte del suelocemento en estructuras de pavimentos.  
Ing. Carlos Antonio Quintanilla Rodriguez.  
Federación Interamericana del Cemento-FICEM, Octubre 2007.

---

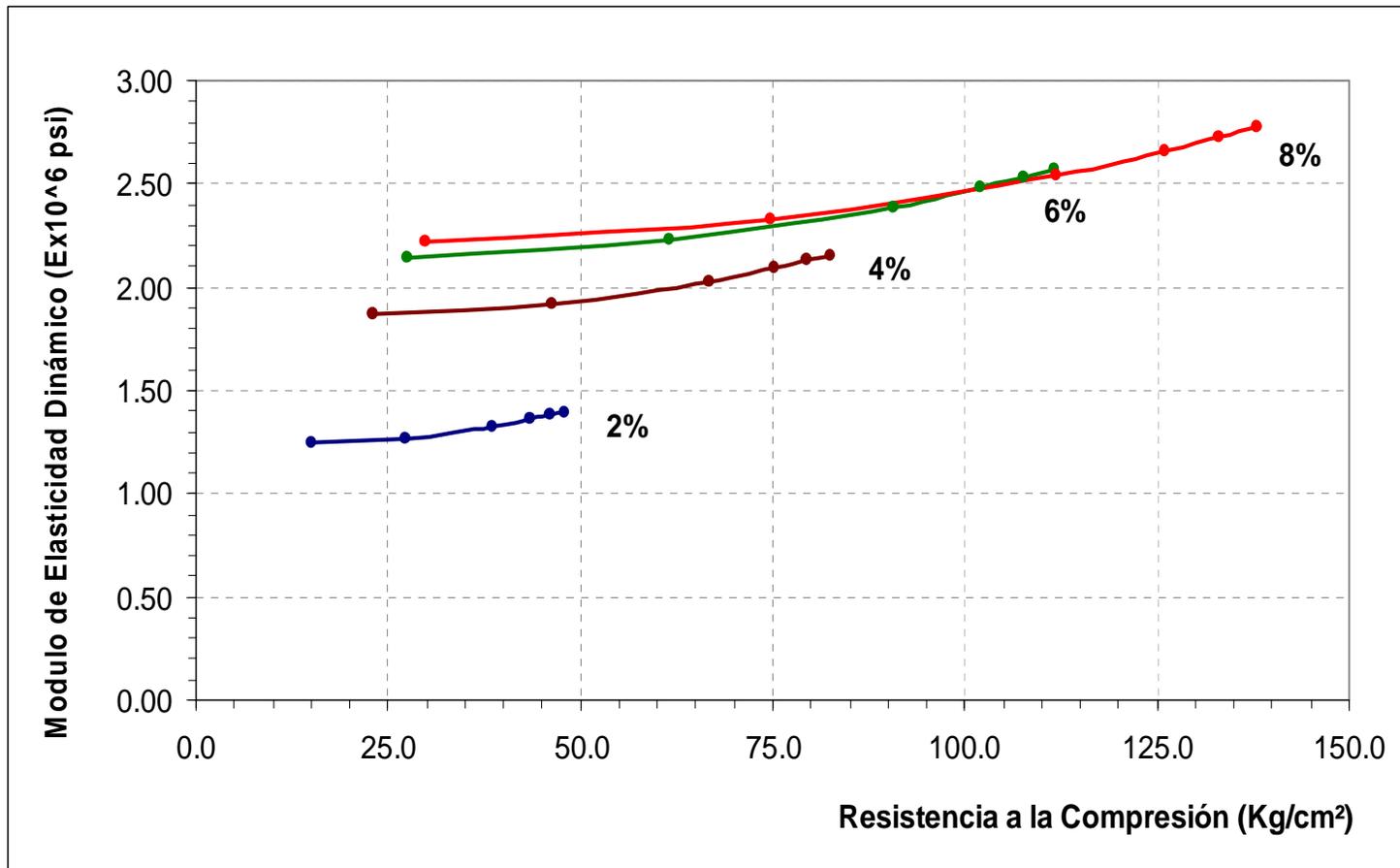
# ANEXOS

---

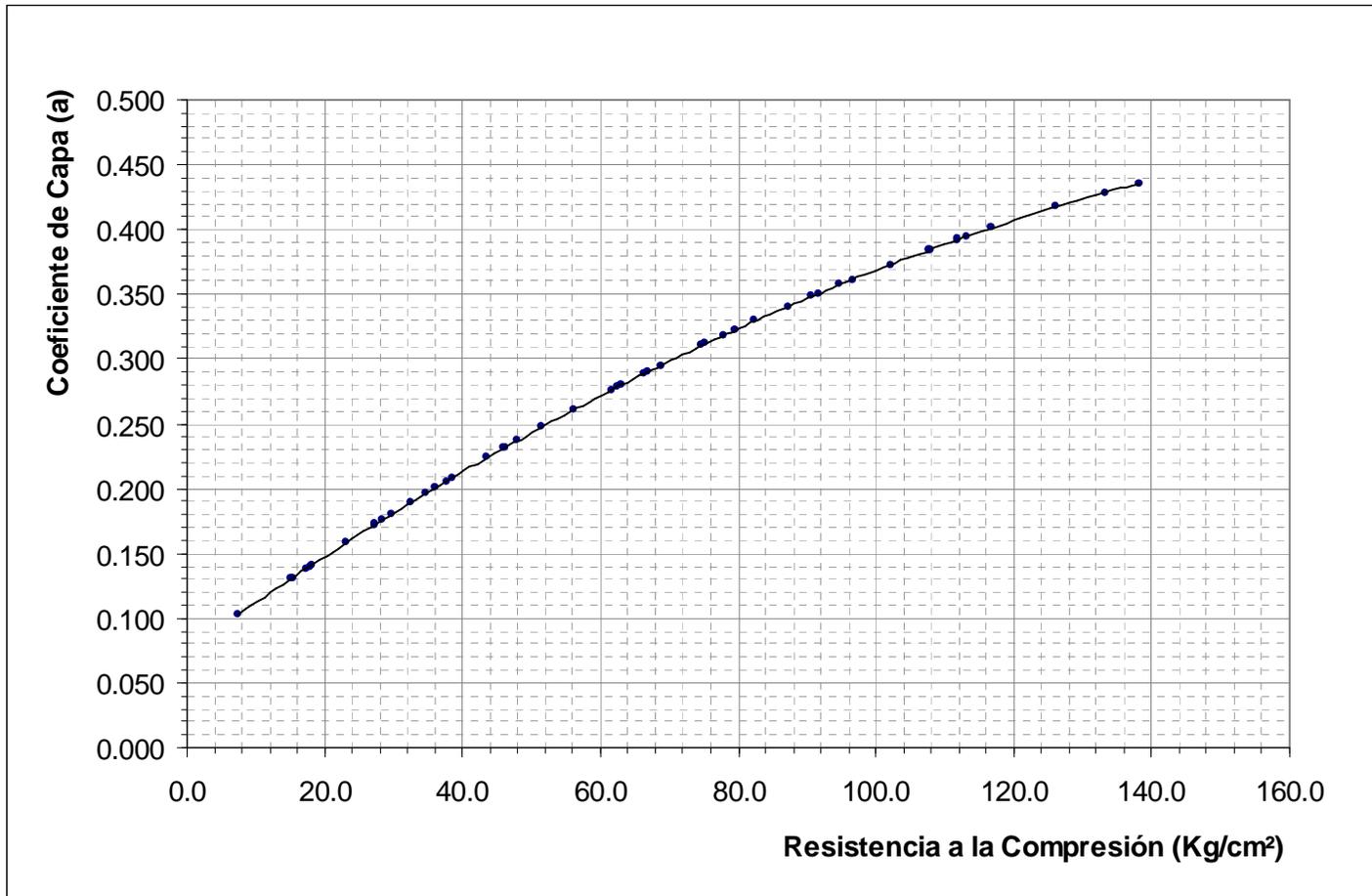
Correlación entre Modulo de elasticidad dinámico y resistencia a la compresión para  
suelo cemento (cemento ASTM C-91 tipo M).



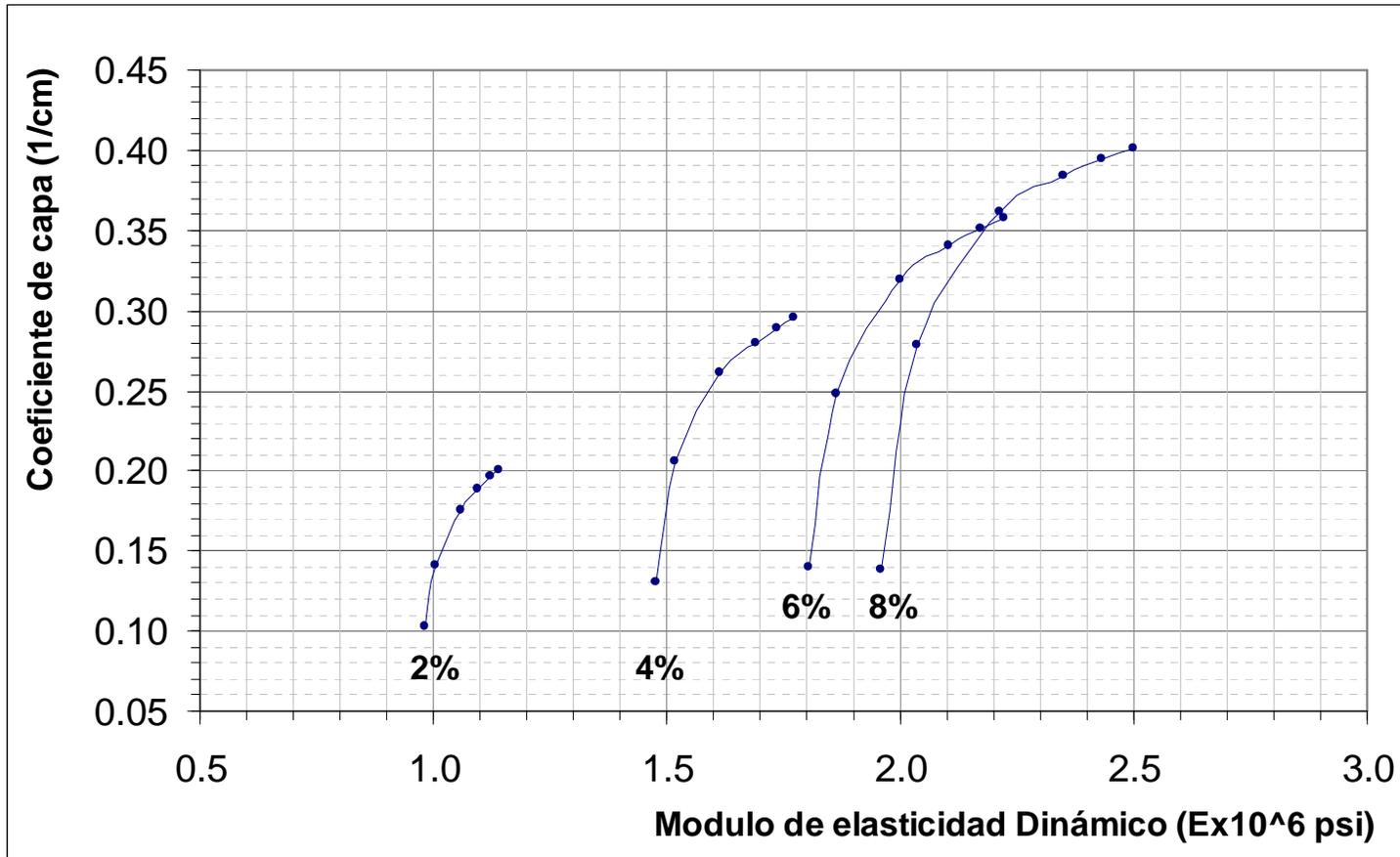
Correlación entre Modulo de elasticidad dinámico y resistencia a la compresión para suelo cemento (cemento ASTM C-1157 tipo HE).



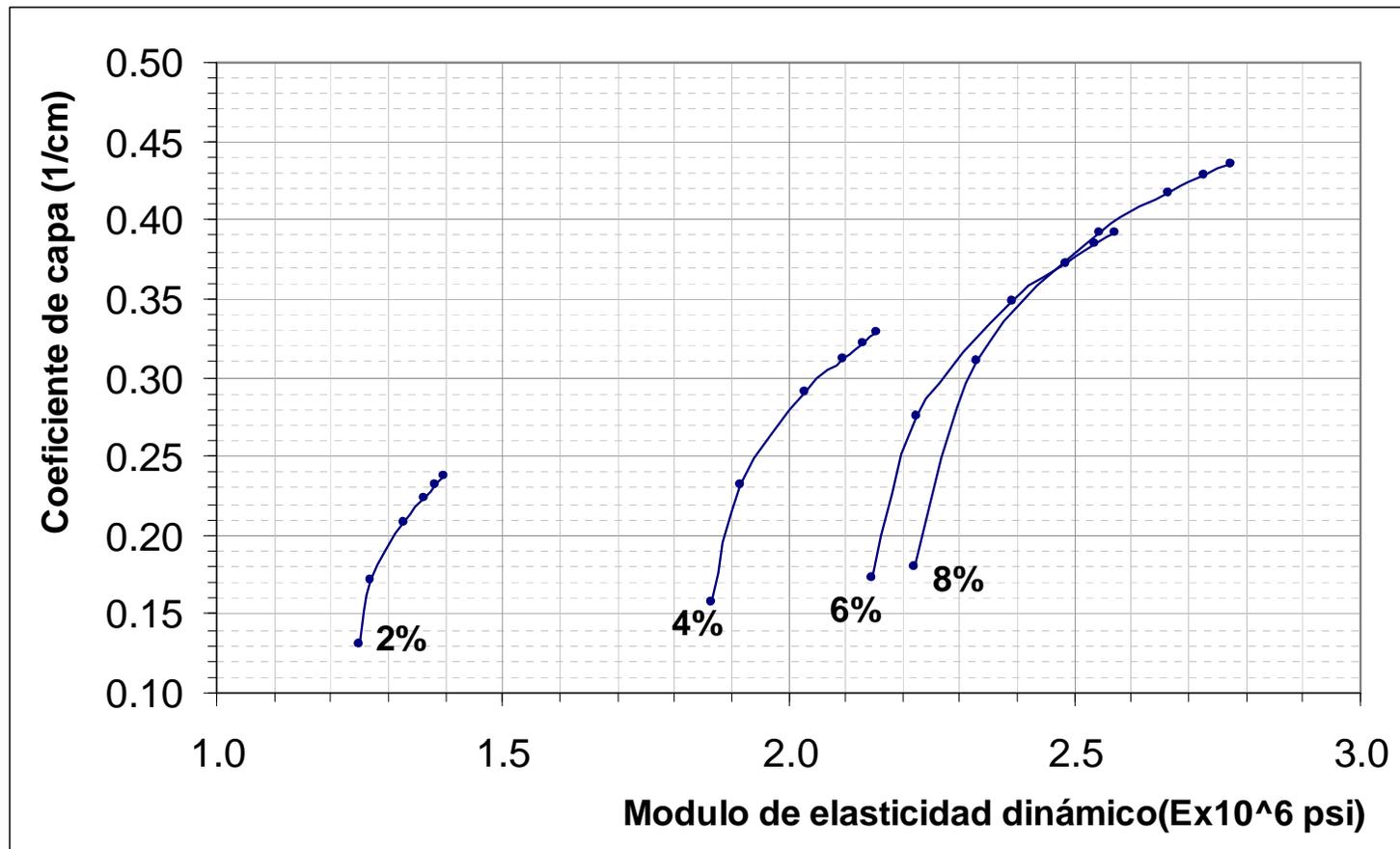
Correlación entre coeficiente de capa y resistencia a la compresión para suelo cemento.



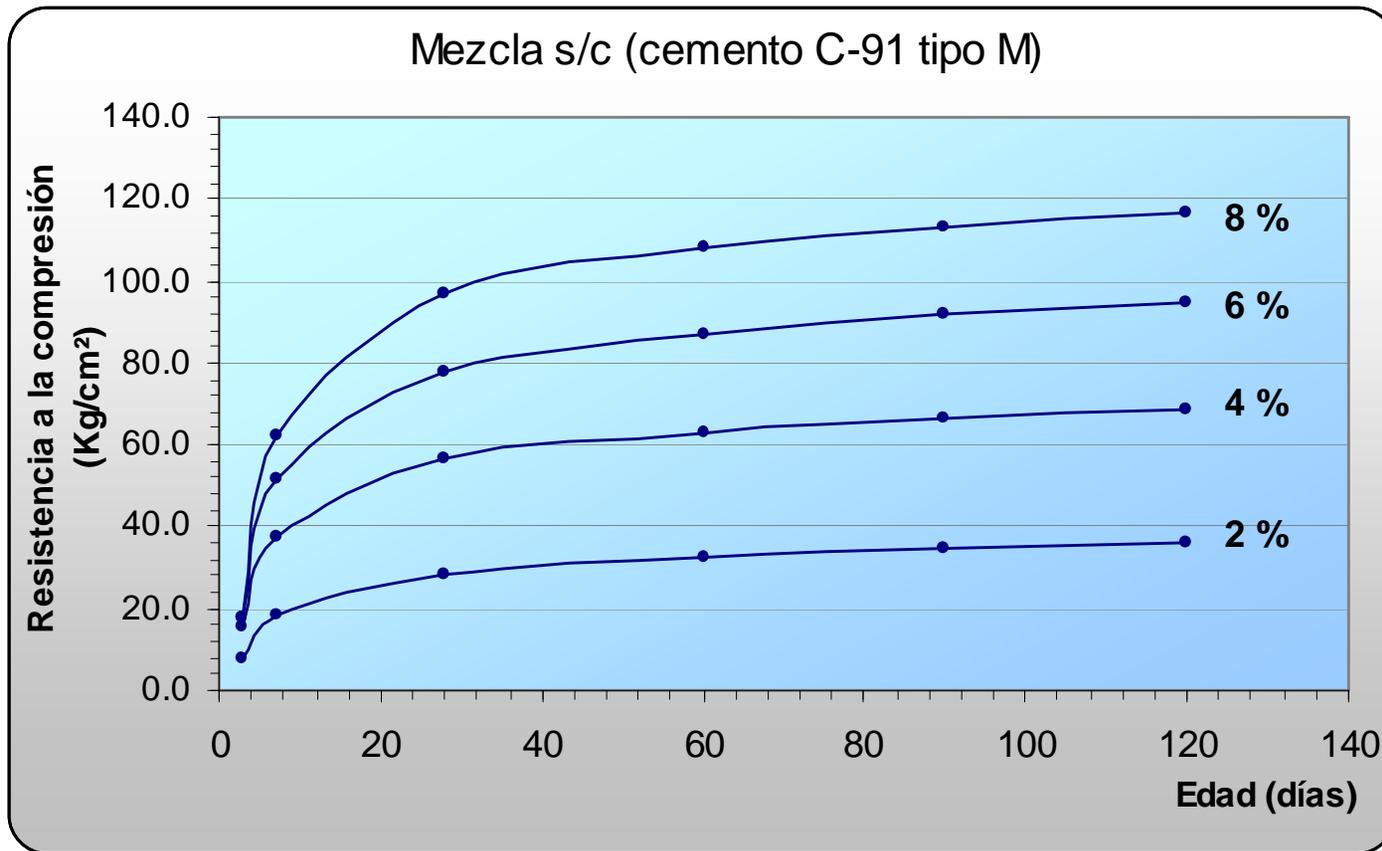
Correlación entre Modulo de elasticidad dinámico y coeficiente de capa para suelo cemento (cemento ASTM C-91 tipo M).



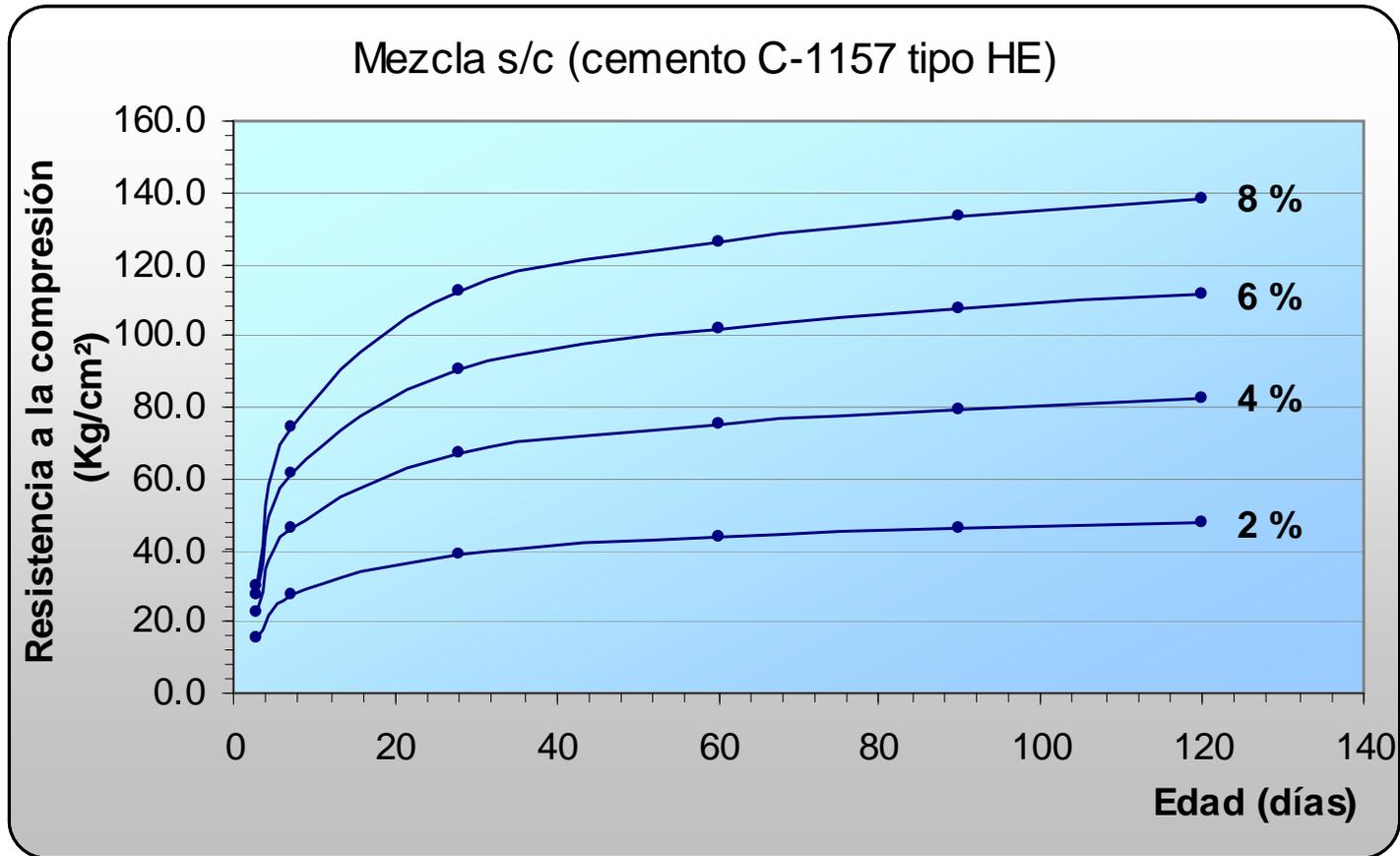
Correlación entre Modulo de elasticidad dinámico y coeficiente de capa para suelo cemento (cemento ASTM C-1157 tipo HE).



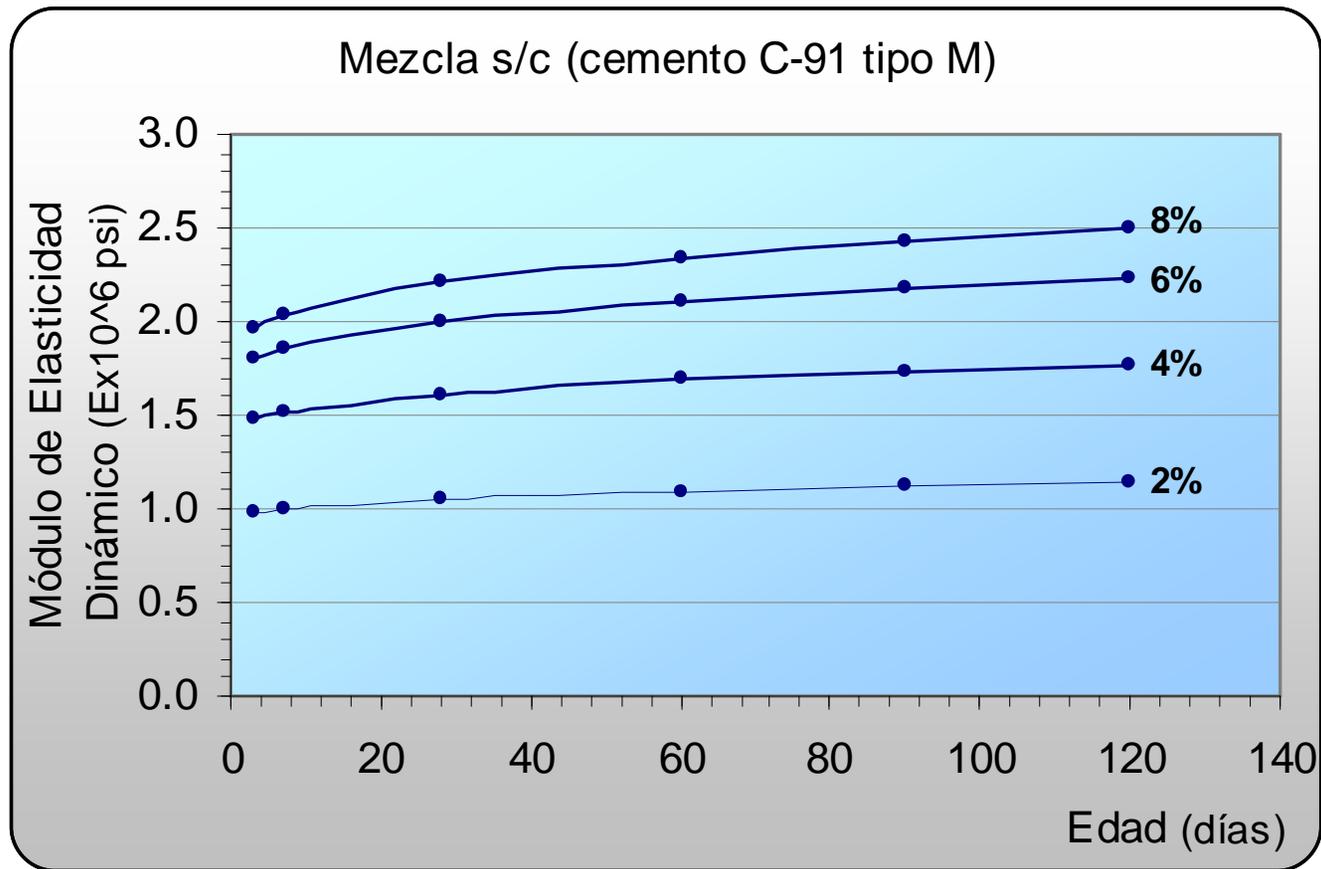
Comportamiento de la resistencia a la compresión simple en el tiempo para diferentes porcentajes de cemento (cemento ASTM C-91 tipo M).



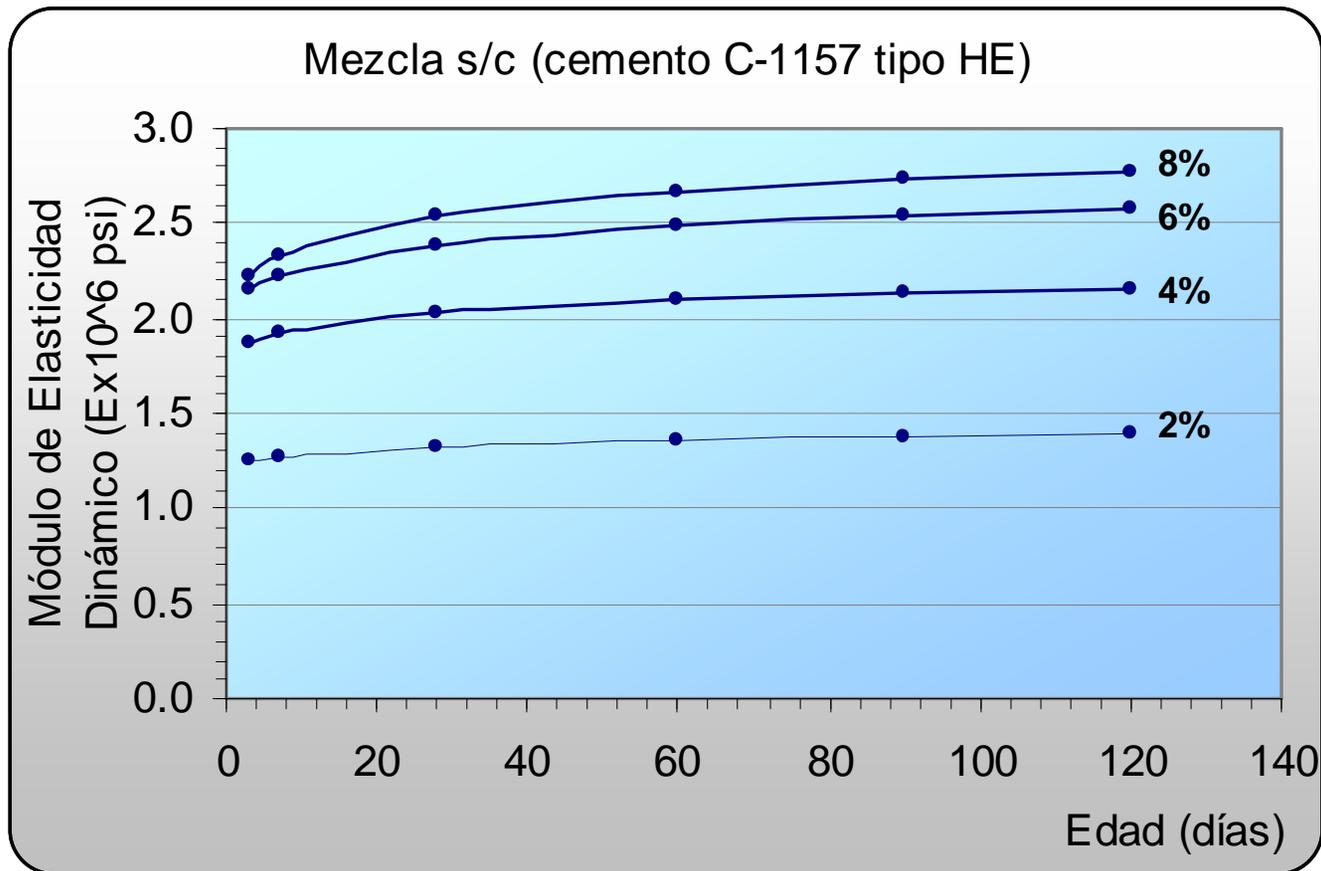
Comportamiento de la resistencia a la compresión simple en el tiempo para diferentes porcentajes de cemento (cemento ASTM C-1157 tipo HE).



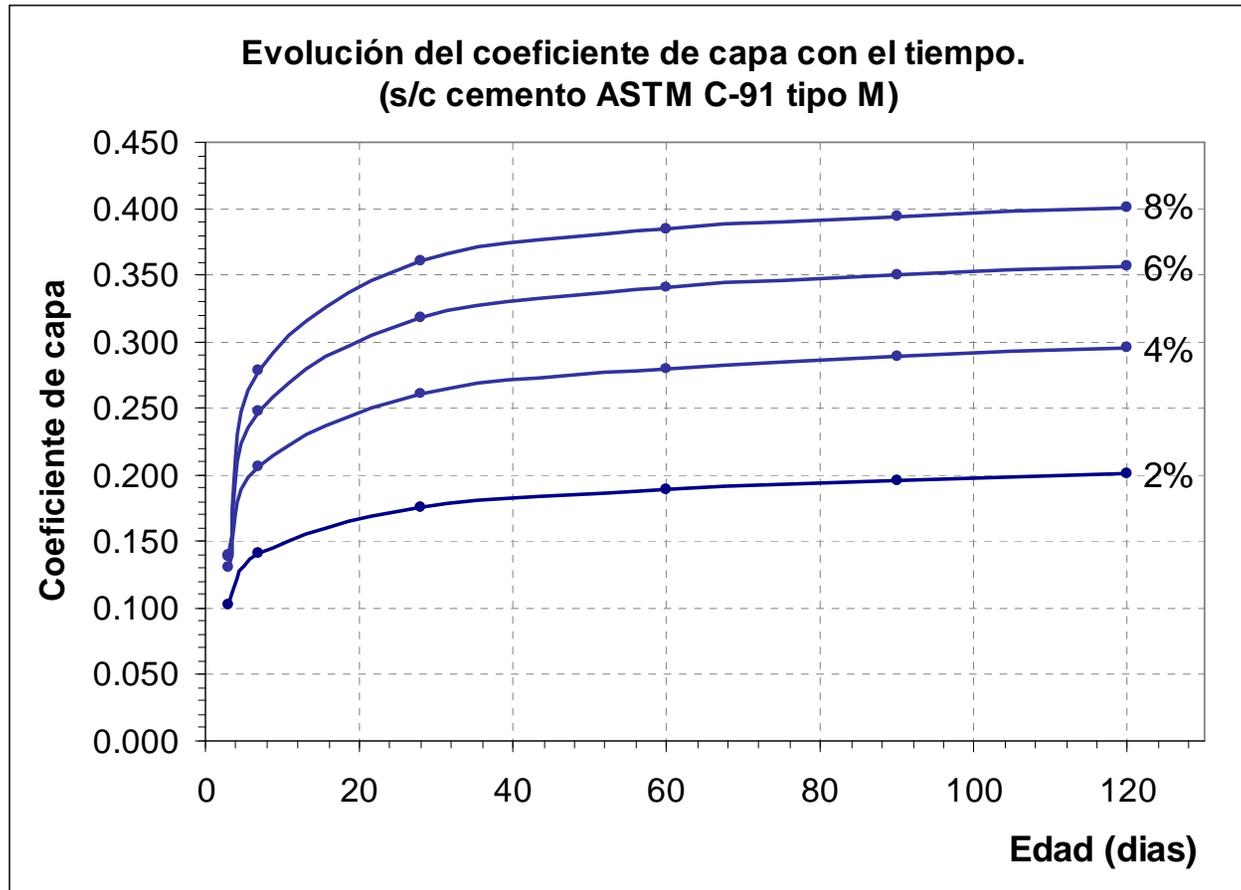
Comportamiento del modulo de elasticidad dinámico en el tiempo para diferentes porcentajes de cemento (cemento ASTM C-91 tipo M).



Comportamiento del modulo de elasticidad dinámico en el tiempo para diferentes porcentajes de cemento (cemento ASTM C-1157 tipo HE).



Evolución del Coeficiente estructural de capa con el tiempo para diferentes porcentajes de cemento (cemento ASTM C-91 tipo M).



Evolución del Coeficiente estructural de capa con el tiempo para diferentes porcentajes de cemento (cemento ASTM C-1157 tipo HE).

